

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

ลักษณะสมบัติทางไฟฟ้า และการวิเคราะห์ของซิลิคอนไดโอดหลังผ่านการเติม  
ด้วยอะตอมแพลตินัม

ELECTRICAL CHARACTERIZATION AND ANALYSIS OF PLATINUM-DOPED  
SILICON DIODES



T128582



จิรวัดน์ ปราบเขต

JIRAWAT PRABKET

๑๕/๑๐  
๒๕๕๕

ที่ en

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน 128582  
วัน, เดือน, ปี 5 11 2555

b. 12553621  
i. ....

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2555

KMITL-2012-EN-D-018-197

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ELECTRICAL CHARACTERIZATION AND ANALYSIS OF PLATINUM-DOPED  
SILICON DIODES



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
DOCTOR OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING  
FACULTY OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
2012  
KMITL-2012-EN-D-018-197

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2012

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ลักษณะสมบัติทางไฟฟ้า และการวิเคราะห์ของซิลิคอนไดโอดหลังผ่านการเติมด้วยอะตอมแพลตตินัม
นักศึกษา	นายจิรวัดน์ ปราบเขต
รหัสประจำตัว	51060012
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2555
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.วิสุทธิ ฐิติรุ่งเรือง
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ดร.อัมพร โพธิ์โย

### บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอผลของการแพร่แพลตตินัมเพื่อควบคุมอายุของพาหะส่วนน้อย (minority carrier lifetime) ในซิลิคอนไดโอดแบบรอยต่อพีเอ็น ทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบตัวแปรสำคัญของไดโอด ได้แก่ กระแสขณะไบอัสตรง (forward current) กระแสรั่วขณะไบอัสย้อนกลับ (leakage current) และค่าอายุของพาหะ นำเสนอการแยกส่วนประกอบ และวิเคราะห์กระแสรั่วไหลรอยต่อของซิลิคอนไดโอดแบบ PiN หลังผ่านการเติมด้วยอะตอมแพลตตินัม ณ อุณหภูมิการแพร่ 850<sup>o</sup>C และ 900<sup>o</sup>C และทำการเปรียบเทียบกับไดโอดที่ไม่เติมอะตอมแพลตตินัม ผลการทดลองพบว่า ไดโอดที่ผ่านการเติมด้วยอะตอมแพลตตินัมจะมีกระแสรั่วไหลรอยต่อมากขึ้น และแปรผันตรงกับอุณหภูมิการแพร่ จากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างลักษณะสมบัติกระแส และค่าส่วนกลับของอุณหภูมิ พบว่าการเพิ่มขึ้นของกระแสรั่วไหลรอยต่อเนื่องมาจากอะตอมของแพลตตินัมทำให้ระดับพลังงานจับยึดในแถบพลังงานของซิลิคอนเปลี่ยนแปลง และส่งผลต่อกลไกการเกิดกระแสรั่วไหลรอยต่อของไดโอด

<b>Thesis</b>	Electrical Characterization and Analysis of Platinum-Doped Silicon Diodes
<b>Student</b>	Mr.Jirawat Prabket
<b>Student ID.</b>	51060012
<b>Degree</b>	Doctor of Engineering
<b>Program</b>	Electrical Engineering
<b>Year</b>	2012
<b>Thesis Advisor</b>	Assoc.Prof.Dr.Wisut Titiroongruang
<b>Thesis Co-Advisor</b>	Dr.Amporn Poyai

## ABSTRACT

This thesis proposes the effect of platinum (Pt) diffusion for minority carrier lifetime control on silicon pn junction diodes. The main diode parameters, namely forward current, leakage current and carrier lifetime are comparatively analyzed. In this work present the separate components and analysis of junction leakage current of Pt-doped silicon PiN diodes at the diffusion temperatures 850 °C and 900 °C and compared to a without Pt-doped diode. The experimental results showed that the junction leakage currents of Pt-doped diodes are increased and directly proportional to the diffusion temperature. From analyzed the relation between the current density versus temperature characteristics, found the increase of junction leakage current due to the atoms of platinum causing a deep energy levels in the band gap of silicon and effect on the mechanisms of junction leakage current of diodes.

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้ด้วยความช่วยเหลือจากอาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.วิสุทธิ์ ฐิติรุ่งเรือง และอาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ดร.อัมพร โพธิ์โย ที่ให้ความช่วยเหลือ ให้คำชี้แนะช่วยแก้ปัญหาตลอดจนให้ความรู้ และประการที่ดีแก่ข้าพเจ้า

ขอขอบพระคุณ นักวิจัย ผู้ช่วยนักวิจัย และพนักงาน ศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ (TMEC) ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ ทุกท่านที่ให้การสนับสนุนงานวิจัยตลอดจนให้คำชี้แนะในกระบวนการสร้างอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ

ขอขอบคุณสถาบันบัณฑิตวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีไทย (TGIST) สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ ตามสัญญาฉบับเลขที่ TG-66-22-51-106D ที่ให้การสนับสนุนเงินทุนวิจัยสำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ขอขอบคุณน้อง ๆ ในศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ทุกคน

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับบิดามารดา ซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และถ่านทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้า

จิรวัดน์ ปราบเขต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา<sup>III</sup> และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญรูป.....	VII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	3
1.3 สมมุติฐานของการศึกษา.....	4
1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย.....	4
1.5 ขอบเขตการวิจัย.....	5
1.6 ขั้นตอนของการศึกษา.....	5
บทที่ 2 การควบคุมอายุพาหะในซิลิคอน.....	6
2.1 บทนำ.....	6
2.2 การรวมตัวผ่านศูนย์กลางเฉพาะที่.....	6
2.3 อิทธิพลของอายุของพาหะต่อลักษณะสมบัติของอุปกรณ์.....	8
2.4 วิธีการควบคุมอายุพาหะ.....	11
2.4.1 การแพร่ด้วยอุณหภูมิสูง.....	11
2.4.2 การฉายรังสี.....	13
2.4.3 เทคนิคคร่อม.....	16
บทที่ 3 การออกแบบ กระบวนการสร้าง และการวัดคุณลักษณะทางไฟฟ้า.....	18
3.1 การออกแบบอุปกรณ์.....	18
3.2 เทคโนโลยีกระบวนการสร้าง.....	20
3.3 ขั้นตอนกระบวนการสร้าง.....	22
3.4 วัดคุณลักษณะทางไฟฟ้า.....	25

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการทดลอง.....	26
4.1 คุณลักษณะกระแส-แรงดัน ขณะได้รับไบอัสตรง.....	26
4.2 คุณลักษณะกระแส-แรงดัน ขณะได้รับไบอัสย้อนกลับ.....	28
4.3 คุณลักษณะความจุ-แรงดันไฟฟ้า.....	30
4.4 ผลของอุณหภูมิ.....	33
บทที่ 5 การวิเคราะห์ และอภิปรายผลการทดลอง.....	36
5.1 การแยกประเภทกระแส.....	36
5.2 อายุพาหะการรวมตัว และการเกิด.....	41
5.3 อายุพาหะในเนื้อสาร และบริเวณผิว.....	42
5.4 ระดับพลังงานกระตุ้น.....	44
บทที่ 6 สรุปผลการทดลอง.....	48
เอกสารอ้างอิง.....	50
ภาคผนวก.....	53
ประวัติผู้เขียน.....	72

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1. เปรียบเทียบลักษณะไดโอดที่มีรูปทรงเลขาคณิตต่างกัน .....	19
3.2. แสดงขั้นตอน การสร้างอย่างง่ายของไดโอดโครงสร้าง PiN.....	22



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 การประยุกต์ใช้งานวงจรทางอิเล็กทรอนิกส์กำลัง.....	2
1.2 การประยุกต์ใช้งานอุปกรณ์กำลังในงานประเภทต่าง ๆ.....	2
2.1 อิทธิพลของความเข้มข้นของทองแดงต่อลักษณะสมบัติด้านไบอัสย้อนกลับของไดโอดกำลัง.....	9
2.2 แนวโน้มตามทฤษฎีของอายุของพาหะ ต่อแรงดันตกคร่อมไบอัสตรงของไดโอดกำลังแบบ PiN กับตัวแปรของความหนาของบริเวณอินทรีนซิก.....	10
2.3 ระดับพลังงานที่เกิดขึ้นในแถบช่องว่างพลังงานของซิลิคอนที่เหมาะสมสำหรับการลดอายุ ของพาหะ.....	11
2.4 ปริมาณการแพร่ที่มีรูปร่างเป็นตัวยูของอะตอมสารเจือระดับลึกเพื่อใช้ลดอายุของพาหะ.....	12
2.5 แผนผังความสัมพันธ์การกระจายตัวความเสียหายของโครงสร้างผลึก กับความลึกหลังจาก การฉายรังสีอนุภาคสูง.....	13
2.6 การกระจายของศูนย์กลางการรวมตัวที่เกิดจากการฉายรังสีอิเล็กตรอนพลังงานสูง.....	14
2.7 ตัวอย่างการเปลี่ยนแปลงการกระจายตัวของอายุพาหะขึ้นกับปริมาณการฉาย รังสีอิเล็กตรอน.....	15
2.8 ความลึกการทะลุผ่านของไอออน $H^+$ และ $He^{++}$ ในผลึกของซิลิคอนเป็นฟังก์ชันของพลังงาน.....	16
3.1 แผนผังแสดงส่วนประกอบการเกิดกระแสของไดโอด (ก) ภาคตัดขวาง (ข) ด้านบน.....	18
3.2 ลักษณะของโครงสร้างทดสอบ เพื่อสำหรับหาค่าตัวแปร.....	19
3.3 ลักษณะ layout ของโครงสร้างไดโอดที่ผ่านการออกแบบด้วย L-Edit.....	20
3.4 เทคโนโลยีกระบวนการสร้างอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ.....	21
3.5 เครื่องจักรที่ใช้ในการสร้างอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ ของศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์.....	22
3.6 ตัวอย่างของแผ่นผลึกซิลิคอนไดโอดแบบ PiN ที่ผ่านกระบวนการสร้างเสร็จแล้ว.....	24
3.7 เครื่องวิเคราะห์คุณลักษณะของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ Agilent รุ่น B1500A.....	25
3.8 Cascade Microtech Model M 150 มี ERS Aircool SP72-300 thermo chuck.....	25
4.1 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันไฟฟ้าของไดโอด ที่ไม่ได้แพร่ด้วยอะตอมของแพลตินัม และผ่านกา แพร่ด้วยอะตอมของแพลตินัมที่อุณหภูมิ 850 และ 900 °C ตามลำดับ.....	26
4.2 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันไฟฟ้าของไดโอดขณะได้รับไบอัสตรง.....	27
4.3. ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันไฟฟ้าขณะได้รับแรงดันย้อนกลับของซิลิคอนไดโอด แบบ PiN ที่ไม่เติมอะตอมแพลตินัม และเติมอะตอมแพลตินัมที่อุณหภูมิ 850 และ 900 °C ตามลำดับ.....	28
4.4 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันไฟฟ้าขณะได้รับแรงดันย้อนกลับที่แรงดันต่างกัน.....	29

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.4. ลักษณะสมบัติความจุ-แรงดันไฟฟ้าพื้นที่ของซิลิคอนไดโอดแบบ PiN ที่ไม่เติมอะตอม แพลตินัม และเติมอะตอมแพลตินัมที่อุณหภูมิ 850 และ 900 °C ตามลำดับ.....	30
4.5 ความสัมพันธ์ระหว่าง $1/C_A^2$ กับ แรงดันไบอัสย้อนกลับ ของซิลิคอนไดโอดแบบ PiN.....	31
4.6 ความกว้างบริเวณปลอดพาหะ-แรงดันไฟฟ้า จากการคำนวณจากค่าความจุไฟฟ้า.....	31
4.7. ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันไฟฟ้า ของซิลิคอนไดโอดแบบ PiN (a) ไม่เติมอะตอมแพลตินัม และเติมอะตอมแพลตินัมที่อุณหภูมิ (b) 850 และ (c) 900 °C ตามลำดับ ภายใต้อุณหภูมิการวัด ตั้งแต่ 300 ถึง 420k .....	32
4.8 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อค่าการรั่วไหลของกระแสรอยต่อที่แรงดัน 5V.....	34
4.9 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อค่าแรงดันตกคร่อมที่ความหนาแน่นกระแส 50 A/cm <sup>2</sup> .....	35
5.1. ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันไฟฟ้าขณะได้รับแรงดันย้อนกลับของซิลิคอนไดโอดแบบ PiN ที่ไม่เติมอะตอมแพลตินัม และเติมอะตอมแพลตินัมที่อุณหภูมิ 850 และ 900 °C ตามลำดับ...37	37
5.2. ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันไฟฟ้า ของซิลิคอนไดโอดแบบ PiN ที่ไม่เติมอะตอม แพลตินัมและเติมอะตอมแพลตินัมที่อุณหภูมิ 850 และ 900 °C ตามลำดับ.....	38
5.3. กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแส ( $I/A$ ) ย้อน กลับ กับอัตราส่วนระหว่างความ ยาวรอบรูปต่อพื้นที่หน้าตัด ( $P/A$ ) ที่แรงดัน $V_R=5V$ .....	39
5.4. $J_A-V_R$ ของซิลิคอนไดโอดแบบ PiN ที่ไม่เติมอะตอมแพลตินัม และเติมอะตอมแพลตินัม ที่อุณหภูมิ 850 และ 900 °C ตามลำดับ.....	39
5.5 ความสัมพันธ์ของ $J_A -W_A$ ของซิลิคอนไดโอดแบบ PiN.....	40
5.6 ความสัมพันธ์ของ $J_{gen} -W_A$ ของซิลิคอนไดโอดแบบ PiN.....	41
5.7 ความสัมพันธ์ของ $\tau_g -W_A$ ของซิลิคอนไดโอดแบบ PiN.....	42
5.8 ความสัมพันธ์ของกระแสบริเวณขอบ-แรงดัน ของซิลิคอนไดโอด.....	43
5.9 ความสัมพันธ์ของ $J_p -W_p$ ของซิลิคอนไดโอด หลังเติมอะตอมแพลตินัม.....	43
5.10. ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันไฟฟ้าขณะได้รับแรงดันย้อนกลับของซิลิคอนไดโอดแบบ PiN (a) ไม่เติมอะตอมแพลตินัม และเติมอะตอมแพลตินัมที่อุณหภูมิ (b) 850 และ (c) 900 °C ตามลำดับ ภายใต้อุณหภูมิการวัดตั้งแต่ 27 ถึง 147 °C.....	43
5.11. Arrhenius plot ความสัมพันธ์ระหว่าง $J_A$ ของซิลิคอนไดโอดแบบ PiN ที่ไม่เติม อะตอมแพลตินัม และเติมอะตอมแพลตินัม ในช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ 27 ถึง 147 °C ที่แรงดัน $V_R=5V$ .....	45

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.12. Arrhenius plot ความสัมพันธ์ระหว่าง $J_{ger}/T^{1.7}$ ของซิลิคอนไดโอดแบบ PiN ที่ไม่เติมอะตอมแพลตินัม และเติมอะตอมแพลตินัม ในช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ 27 ถึง 147 °C ที่แรงดัน $V_R=5V$ .....	46
5.13. Arrhenius plot ความสัมพันธ์ระหว่าง $J_{dA}/T^{3.4}$ ของซิลิคอนไดโอดแบบ PiN ที่ไม่เติมอะตอมแพลตินัม และเติมอะตอมแพลตินัม .....	47



# บทที่ 1

## บทนำ

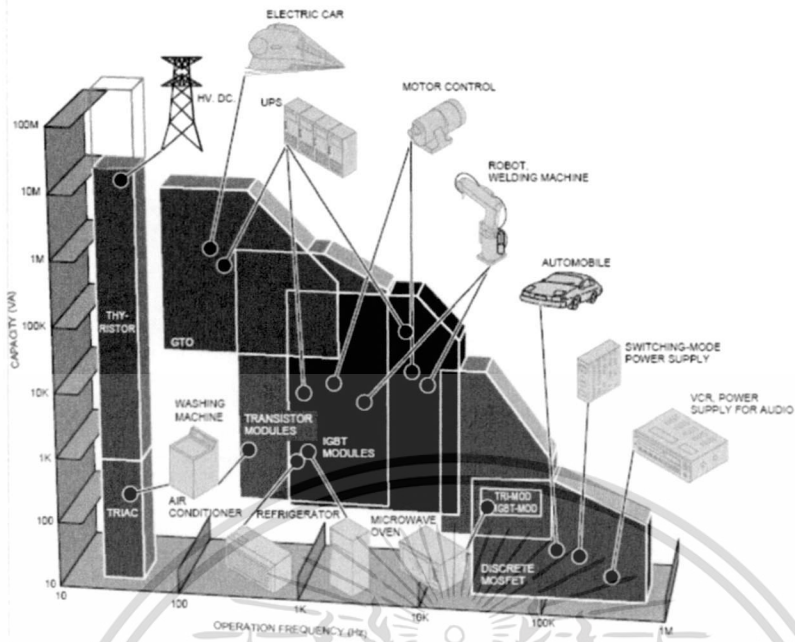
### 1.1 ความสำคัญ และที่มาของประเด็นปัญหาการวิจัย

อาจกล่าวได้ว่า ประวัติทางอิเล็กทรอนิกส์กำลัง เริ่มขึ้นในปี 1900 โดยเริ่มจากการประดิษฐ์อุปกรณ์ประเภท Mercury arc rectifier จากนั้นก็มีการพัฒนาอุปกรณ์จำพวก Metal take rectifier, Grid controlled vacuumtube rectifier, Ignitron, Phanotron และ Thyatron เกิดขึ้นตามมาอุปกรณ์เหล่านี้ถูกใช้ในการควบคุมกำลังไฟฟ้าจนกระทั่งปี 1950

การปฏิวัติอิเล็กทรอนิกส์เกิดขึ้นครั้งแรกในปี 1948 ด้วยนวัตกรรมของซิลิคอนทรานซิสเตอร์ที่พัฒนาขึ้นในห้องปฏิบัติการ Bell Telephone ซึ่งแม้ในปัจจุบัน เทคโนโลยีการผลิตอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์กำลัง ขั้นสูงก็มีพื้นฐานมาจากนวัตกรรมนี้ ต่อมาในปี 1956 ห้องปฏิบัติการนี้ก็ได้ออกนวัตกรรมใหม่ คือ PNPN ทริกเกอร์ ทรานซิสเตอร์ ซึ่งในปัจจุบันเป็นที่รู้จักกันในนามของ ไทริสเตอร์ (Thyristor) หรือ เอสซีอาร์(SCR)

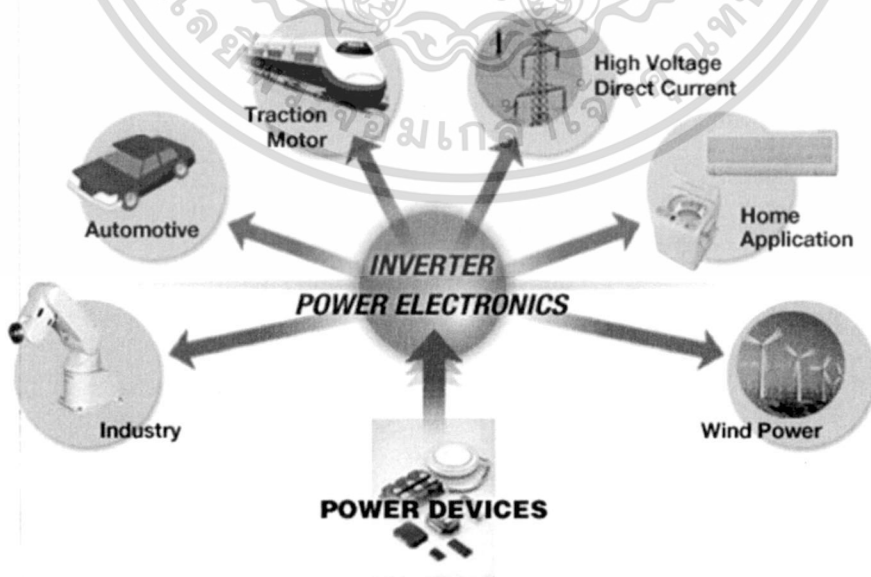
ต่อมาในปี 1958 บริษัทเจเนเนอรัล อิเล็กทรอนิกส์ ได้ประดิษฐ์ไทริสเตอร์ที่นำมาขายในเชิงพาณิชย์ขึ้น ซึ่งนับเป็นจุดเริ่มต้นของการประยุกต์ใช้งานของสาขาด้านอิเล็กทรอนิกส์กำลังนี้ จากนั้นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์แบบต่างๆได้ถูกสร้าง และพัฒนาขึ้นเป็นจำนวนมาก การพัฒนาเทคโนโลยีทางไมโครอิเล็กทรอนิกส์ในการสร้างอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์กำลัง ที่มีประสิทธิภาพสูงขึ้นทำให้วงจรทางอิเล็กทรอนิกส์กำลัง เป็นที่นิยมอย่างสูงตั้งแต่ปี 1980

ในปัจจุบันการพัฒนาเทคโนโลยีอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำกำลังมีความก้าวหน้าไปอย่างมาก ทำให้พิกัดของอุปกรณ์เหล่านี้ในด้านความเร็วในการสวิตซ์ และพิกัดกำลังของอุปกรณ์สูงขึ้น ซึ่งทำให้สามารถลดข้อจำกัดในอดีต และขยายประสิทธิภาพในการใช้งานวงจรทางอิเล็กทรอนิกส์กำลัง การพัฒนาเทคโนโลยีทางด้านไมโครโพรเซสเซอร์ และไมโครคอมพิวเตอร์เป็นอีกส่วนหนึ่งที่ส่งผลให้การควบคุม และการสังเคราะห์วิธีการควบคุมอุปกรณ์ และวงจรทางอิเล็กทรอนิกส์กำลังทำได้ดีขึ้นเช่นกัน เป็นที่รู้จักกันโดยทั่วไปแล้วว่า วงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังเป็นวงจรที่สำคัญ และใช้ในอุปกรณ์ทางไฟฟ้ากำลังหลายชนิด อาทิเช่น ระบบควบคุมความร้อน, ระบบควบคุมแสงสว่าง, ระบบควบคุมมอเตอร์, แหล่งจ่ายไฟ, รถยนต์ไฟฟ้า, ระบบไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง(HVDC) ฯลฯ สาขาวิชานี้มีการประยุกต์ใช้ความรู้ของหลายสาขาวิชาเข้าด้วยกัน เพื่อให้เข้าใจถึงการนำไปใช้ แสดงตัวอย่างการประยุกต์ใช้งานวงจรทางอิเล็กทรอนิกส์กำลัง ดังในรูปที่ 1.1



รูปที่ 1.1 การประยุกต์ใช้งานวงจรทางอิเล็กทรอนิกส์กำลัง

โดยอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำกำลังที่สำคัญในระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลัง ได้แก่ Power diode ,IGBT ,Power MOSFET, Thyristor, GTO เป็นต้น โดยอุปกรณ์เหล่านี้ได้ถูกนำไปใช้ในอินเวอร์เตอร์ และคอนเวอร์เตอร์ซึ่งประยุกต์ใช้งานด้านต่างๆ เช่น แขนกลในโรงงานอุตสาหกรรม อุตสาหกรรมยานยนต์ รถไฟฟ้า ระบบสายส่งกำลัง ตลอดจนเครื่องใช้ไฟฟ้าภายในบ้าน ดังแสดงในรูปที่ 1.2



รูปที่ 1.2 การประยุกต์ใช้งานอุปกรณ์กำลังในงานประเภทต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 1.2 จะเห็นได้ว่าอินเวอร์เตอร์เป็นระบบ หรือวงจรที่ถูกนำไปใช้กับงานอิเล็กทรอนิกส์กำลัง ประเภทต่างๆ โดยส่วนประกอบสำคัญของอินเวอร์เตอร์ คือ ไดโอดกำลัง(Power diode) และ Power switching ดังนั้น การวิจัย และพัฒนาไดโอดกำลังจึงเป็นสิ่งที่ผู้ทำวิจัยให้ความสนใจ เพราะนอกจากได้ประโยชน์ในแง่ของการพัฒนางานวิจัยด้านไมโครอิเล็กทรอนิกส์ของประเทศแล้ว ยังมีประโยชน์ในแง่การค้าด้วย เนื่องจากไดโอดกำลังเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังที่มีมูลค่าการตลาดสูงอีกด้วย

ไดโอดกำลังแบบซิลิคอน ซึ่งเป็นอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำที่ทำหน้าที่เป็นตัวเรียงกระแสไฟฟ้ากำลัง (power rectifier) เริ่มถูกนำมาใช้งานในระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลัง ตั้งแต่ช่วงทศวรรษที่ 1950 กระทั่งในช่วงทศวรรษที่ 1980 สามารถผลิตจำหน่ายในเชิงการค้าได้ โดยไดโอดกำลังในขณะนั้นเป็นแบบกึ่งพวงศักร์ยี่ห้อซีดี หรือแบบ PIN โดยที่ไดโอดกำลังแบบซีดีซิลิคอนจะถูกนำไปประยุกต์ใช้งานในช่วงแรงดันต่ำกว่า 100 V เนื่องจากแรงดันตกคร่อมขณะนำกระแสที่ต่ำกว่า และมีความเร็วสวิตช์ที่สูงกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับไดโอดกำลังแบบ PIN แต่เนื่องจากมีความต้านทานอนุกรมสูงจากบริเวณการดริฟท์(เป็นบริเวณที่ประจุพาหะเคลื่อนที่ด้วยสนามไฟฟ้า) ซึ่งเกิดจากผลของการออกแบบไดโอดกำลังแบบซีดีซิลิคอนให้สามารถทนแรงดันได้มากขึ้น อีกทั้งมีค่ากระแสรั่วย้อนกลับค่อนข้างสูงโดยเฉพาะในช่วงได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับค่าสูงๆ ด้วยเหตุนี้โดยทั่วไปแล้วไดโอดกำลังแบบ PIN จึงถูกนำมาประยุกต์ใช้งานในกรณีที่ต้องการให้ไดโอดกำลังสามารถทนแรงดันได้มากกว่า 100 V

ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้เสนองานวิจัยนี้เพื่อจะทำการศึกษาเพื่อหาความเป็นไปได้ในวิธีการการปรับค่าของอายุพาหะ เงื่อนไขการทดลองที่เหมาะสม และค่าตัวแปรทางฟิสิกส์ที่สำคัญ เพื่อใช้ในการอธิบายปรากฏการณ์พฤติกรรม และกลไกที่เกิดขึ้นกับไดโอดกำลัง รวมถึงการหาค่าที่เหมาะสมของอายุพาหะส่วนน้อย และศึกษาผลของการควบคุมอายุของพาหะที่มีต่อพฤติกรรมของไดโอดกำลังแบบซิลิคอน ทั้งนี้เพื่อนำข้อมูล วิธีการ และผลการวิเคราะห์ต่างๆ ที่ได้ มาใช้สำหรับการเพิ่มประสิทธิภาพของไดโอดกำลังแบบซิลิคอน ทั้งด้านสแตติก (static) และด้านไดนามิกส์ (dynamic) ได้แก่ ค่าแรงดันตกคร่อมขณะได้รับไบอัสตรง ( $V_F$ ) ค่ากระแสขณะได้รับไบอัสตรง ( $I_F$ ) ค่ากระแสรั่วขณะได้รับไบอัสย้อนกลับ ( $I_R$ ) คาบเวลาในการสวิตช์ ( $t_{rr}$ ) ต่อไป

## 1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

ถึงแม้ว่าการแพร่อะตอมแพลตตินั่มเพื่อลดอายุของพาหะดูเหมือนไม่ยุ่งยาก ไม่ต้องการการควบคุมที่แม่นยำ และถูกนำมาใช้เป็นแล้วกว่า 40 ปี [1] ซึ่งทั่วไปช่วงอุณหภูมิการแพร่อยู่ในระหว่าง 800 ถึง 1000<sup>o</sup>C โดยการเคลือบแผ่นผลึกด้วยฟิล์มบางของทองจากการระเหยไอ หรือการสปัตเตอร์ จึงแล้วการลดอายุพาหะด้วยวิธีการดังกล่าวนี้ เป็นเทคนิคที่มีข้อดีในหลายๆ ด้าน และราคายังไม่แพงเมื่อเทียบกับเทคนิคอื่นๆ แต่เมื่อการพัฒนาเทคโนโลยีอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำกำลังมีความก้าวหน้าไปอย่างมาก ทำให้พิกัดของอุปกรณ์เหล่านี้ทั้งในด้านความเร็วในการสวิตช์ และพิกัดกำลังของอุปกรณ์สูงขึ้น ทำให้ต้องออกแบบอุปกรณ์ที่สามารถตอบสนองการใช้งานที่มีประสิทธิภาพสูงเพิ่มขึ้นไปด้วย ดังนั้นการหาวิธีการ และเงื่อนไขที่เหมาะสมในการปรับปรุงค่าอายุของพาหะเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของไดโอดกำลังแบบซิลิคอนจึงเรื่องจำเพาะ และเจาะจง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการประยุกต์ใช้งานในแต่ละด้าน และพิกัด อีกทั้งต้องหาวิธีการการออกแบบ และขั้นตอนที่เหมาะสมจนสามารถนำไปใช้งานเพื่อการผลิตในเชิงอุตสาหกรรมได้ด้วย

### 1.3 สมมติฐานของการศึกษา

วิธีการควบคุมอายุพาหะส่วนน้อย ถูกนำไปใช้อย่างแพร่หลายในอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำกำลังความเร็วสูงรวมถึงซิลิคอนไดโอดกำลังโครงสร้าง PiN ด้วย เนื่องจากสามารถช่วยลดช่วงเวลาฟื้นตัวย้อนกลับ (reverse recovery time) และการสูญเสียพลังงาน (energy loss) ของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำกำลังระหว่างกระบวนการในสถานะนำกระแส (On-state) และสถานะหยุดนำกระแส (Off-state) ได้ [2-3] ในปัจจุบันการเติมอะตอมของแพลทินัมด้วยการแพร่ที่อุณหภูมิสูง เป็นอีกวิธีการหนึ่งที่ยอมรับใช้ควบคุมอายุพาหะส่วนน้อยในอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำกำลัง โดยอะตอมของแพลทินัมทำให้เกิดระดับลึก (deep level) ในช่องว่างพลังงานของซิลิคอน[4] ซึ่งระดับเหล่านั้น จะประพุดิตัวเป็นศูนย์กลางการเกิด และการรวมตัวใหม่ของพาหะส่วนน้อยในตัวอุปกรณ์ได้ และเนื่องด้วยความต้องการใช้ซิลิคอนไดโอดกำลังโครงสร้าง PiN เพิ่มขึ้น ทั้งในแง่ของปริมาณ กำลังงาน และแรงดันที่สูงขึ้น ส่งผลให้การพัฒนา และวิจัยอุปกรณ์ดังกล่าวต้องดำเนินการอย่างเร่งด่วน ดังนั้นการที่จะทำให้ประสิทธิภาพของไดโอดกำลังแบบซิลิคอนสูงขึ้น จึงทำได้โดยการควบคุมค่าอายุของพาหะส่วนน้อยที่เหมาะสม นั่นเอง

### 1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย

ในงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการปรับค่าของอายุพาหะส่วนน้อย (minority carrier lifetime) ในไดโอดกำลังแบบซิลิคอน โดยการสร้างตำหนิ (defect) เพื่อทำให้เกิดระดับพลังงานระดับลึก (deep energy level) โดยการฉายรังสีอิเล็กตรอน (Electron irradiation) ตำหนิเหล่านี้มีคุณสมบัติทำให้เกิดระดับลึกในแถบพลังงานของซิลิคอน ซึ่งระดับพลังงานดังกล่าวจะประพุดิตัวเป็นศูนย์กลางการจับยึด (trap center) การรวมตัวใหม่ (recombination center) ทำให้ค่าอายุการเกิด (generation lifetime) และค่าอายุการรวมตัวใหม่ (recombination lifetime) ของพาหะเปลี่ยนแปลง ซึ่งจะส่งผลให้คุณสมบัติของสารกึ่งตัวนำ และลักษณะสมบัติของไดโอดกำลังเปลี่ยนแปลงด้วย ในงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาวิธีการการปรับค่าของอายุพาหะ หาเงื่อนไขการทดลอง และหาค่าตัวแปรทางฟิสิกส์ (physical parameter) ที่สำคัญ เพื่อใช้ในการอธิบายปรากฏการณ์ พฤติกรรม และกลไกที่เกิดขึ้นกับไดโอดกำลัง รวมถึงการหาค่าที่เหมาะสมของอายุพาหะส่วนน้อย และศึกษาผลของการควบคุมอายุของพาหะที่มีต่อพฤติกรรมของไดโอดกำลังแบบซิลิคอน ทั้งนี้เพื่อนำข้อมูล วิธีการ และผลการวิเคราะห์ต่างๆ ที่ได้ มาใช้สำหรับการเพิ่มประสิทธิภาพของไดโอดกำลังแบบซิลิคอน ทั้งด้านสแตติก (static) และด้านไดนามิกส์ (dynamic) เช่น ค่าแรงดันตกคร่อมขณะได้รับไบอัสตรง ( $V_F$ ) ค่ากระแสขณะได้รับไบอัสตรง ( $I_F$ ) ค่ากระแสรั่วขณะได้รับไบอัสย้อนกลับ ( $I_R$ ) ความเร็วในการสวิตชิง ( $t_{rr}$ ) เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.5 ขอบเขตการวิจัย

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ดำเนินการศึกษาผลของการควบคุมอายุของพาหะที่มีต่อพฤติกรรมของไดโอดกำลังแบบซิลิคอนด้วยวิธีการเติมอะตอมแพลตินัม เพื่อนำข้อมูล วิธีการ และผลการวิเคราะห์ต่างๆ ที่ได้ มาใช้สำหรับการเพิ่มประสิทธิภาพของไดโอดกำลังแบบซิลิคอนให้สูงขึ้น ทั้งด้านสแตติก และด้านไดนามิกส์ ของไดโอดกำลัง เช่น ค่าแรงดันตกคร่อมขณะได้รับไบอัสตรง ค่ากระแสขณะได้รับไบอัสตรง ค่ากระแสรั่วขณะได้รับไบอัสย้อนกลับ และ ความเร็วในการสวิตชิง เป็นต้น โดยเริ่มจากศึกษาวิธีการปรับค่าอายุของพาหะด้วยวิธีการต่างๆ ศึกษาขีดความสามารถของเครื่องจักร วิธีการเตรียมชิ้นงาน ตลอดจนการทำ profile และหาค่าความสม่ำเสมอของค่าอายุพาหะในแผ่นซิลิคอนขนาด 6 นิ้ว จากนั้นศึกษาการปรับค่าอายุของพาหะที่มีต่อลักษณะสมบัติของโครงสร้างทดสอบ(TEG) และทำการวัด และวิเคราะห์ ลักษณะสมบัติทางไฟฟ้า นำข้อมูลมาวิเคราะห์หาแนวทางเพื่อปรับปรุง และออกแบบเพื่อศึกษาการออกแบบ และกระบวนการผลิตไดโอดกำลังแบบซิลิคอน ของศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์(TMEC)

## 1.6 ขั้นตอนของการศึกษา

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้แบ่งเนื้อหาออกเป็น 6 บท ได้แก่

บทที่ 1 กล่าวถึงความสำคัญ และที่มาของประเด็นปัญหาการวิจัย ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา สมมุติฐานของการศึกษา ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย และขอบเขตการวิจัย

บทที่ 2 ทฤษฎีเกี่ยวกับการควบคุมอายุพาหะในซิลิคอนไดโอด การรวมตัวผ่านศูนย์กลางเฉพาะที่ อิทธิพลของอายุของพาหะต่อลักษณะสมบัติของอุปกรณ์ รวมถึงเทคนิคสำหรับการลดค่าอายุของพาหะ และวิธีการหาค่าอายุของพาหะในไดโอดโครงสร้าง PiN

บทที่ 3 เป็นขั้นตอนการออกแบบ กระบวนการสร้าง และการวัดคุณลักษณะทางไฟฟ้า

บทที่ 4 ผลการทดลอง จะอธิบายถึงคุณลักษณะทางไฟฟ้าของไดโอด ขณะได้รับไบอัสตรง และย้อนกลับ รวมถึงค่าความจุไฟฟ้า

บทที่ 5 ในบทนี้เป็นการวิเคราะห์ และอภิปรายผลการทดลอง เพื่อหาตัวแปรต่างๆ

บทที่ 6 เป็นการสรุปผลการวิเคราะห์ข้อมูลทั้งหมด

## บทที่ 2

# การควบคุมอายุพาหะในซิลิคอนไดโอด

### 2.1 บทนำ

ลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของอุปกรณ์ประเภทไบโพลาร์ (bipolar device) ได้แก่ ไดโอด ทรานซิสเตอร์ ไซริสเตอร์ IGBTs และรวมถึงโครงสร้างวงจรรวมก็ขึ้นอยู่กับอายุของพาหะส่วนเกิน เช่นกัน อุปกรณ์ประเภทไบโพลาร์ที่มีรูปทรงเรขาคณิตเหมือนกันแต่มีค่าอายุของพาหะส่วนเกินต่างกันจะมีลักษณะสมบัติสถานะนำกระแส และไดนามิกส์ที่ต่างกัน สำหรับอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง อย่างเช่น ไดโอด ไซริสเตอร์ และ IGBTs ค่าอายุของพาหะยาวเป็นที่ต้องการ เพื่อจะทำให้การสูญเสียในสถานะนำกระแสน้อยจนเป็นที่ยอมรับได้ ในทางกลับกัน อุปกรณ์ที่ต้องการให้ทำงานที่ความถี่สูง ต้องการให้อายุของพาหะที่สั้น เพื่อให้หยุดนำกระแสได้เร็ว และมีประจุไฟฟ้าพื้นตัวย้อนกลับน้อยที่สุด ในกรณีของอุปกรณ์ซิลิคอน อายุของพาหะส่วนเกินส่วนใหญ่ซึ่งถูกควบคุมด้วยศูนย์กลางการรวมตัวเฉพาะที่โดยการทำให้เกิดพลังงานระดับลึกในช่องว่าง [1] จนกระทั่งความหนาแน่นของกระแสไปถึงระดับของลำดับ  $10^3 \text{ A/cm}^2$  ซึ่งในช่วงนี้การรวมตัวแบบโอเจอร์ (Auger recombination) จะเด่นขึ้นทันที [2] ส่วนในช่วงของความหนาแน่นกระแสซึ่งใช้งานปกติ อายุของพาหะแปรผกผันกับความเข้มข้นของศูนย์กลางการรวมตัว :  $\tau \sim N_T^{-1}$ .

### 2.2 การรวมตัวผ่านศูนย์กลางเฉพาะที่

ทฤษฎีของการเกิด และการรวมตัวของพาหะผ่านศูนย์กลางเฉพาะที่ โดยปกติแล้วจะอ้างอิงถึงทฤษฎีของ Shockley-Read-Hall [3], [4], [5]. ในระหว่างกระบวนการรวมตัว คู่พาหะ อิเล็กตรอน-โฮล รวมตัวผ่านระดับลึกของอะตอมเจือปน ขึ้นกับลักษณะของความเข้มข้นของความไม่บริสุทธิ์ ( $N_T$ ) ระดับพลังงาน ( $E_T$ ) ในแถบช่องว่างพลังงาน และ capture cross section ของอิเล็กตรอน ( $\sigma_n$ ) และโฮล ( $\sigma_p$ ) ตามลำดับ สำหรับระดับลึกของอะตอมผู้ให้เดี่ยว ความเร็วการรวมตัวแสดงโดย

$$R_n = -\frac{d\Delta n}{dt} = v_{th,n} \sigma_n (nN_T^+ - n_1 N_T^*) \quad (2.1)$$

$$R_p = -\frac{d\Delta p}{dt} = v_{th,p} \sigma_p (pN_T^+ - p_1 N_T^*) \quad (2.2)$$

เมื่อ  $v_{th,p}$  และ  $v_{th,n}$  คือ อัตราเร็วความร้อนของโฮล และอิเล็กตรอน,  $N_T^+$  คือ ความเข้มข้นศูนย์กลางไอออนไนซ์,  $N_T^*$  คือ ความเข้มข้นศูนย์กลางเป็นกลาง,  $n_1$  และ  $p_1$  คือ ความเข้มข้นของโฮล และ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อิเล็กตรอน ถ้าระดับเฟอร์มิเท่ากันกับศูนย์กลางระดับพลังงาน นั่นคือ

$p_1 = N_V \exp[-(E_G - E_T)/kT]$  และ  $n_1 = N_C \exp[-E_T/kT]$  จากความสัมพันธ์เดียวกันสามารถใช้สำหรับกรณีของระดับลึกของอะตอมผู้รับเดี่ยว ได้เช่นกัน

เพื่อรักษาสภาพสมดุลพลศาสตร์ จำเป็นต้องรักษาเงื่อนไขความเป็นกลางทางไฟฟ้า (electroneutrality) ไว้ ซึ่งให้ความเข้มข้นของศูนย์กลางต่ำกว่าความเข้มข้นของพาหะส่วนใหญ่ในภาวะสมดุลมาก ๆ ( $N_T \ll n_0 + p_0$ )  $R_n = R_p$  และอายุของพาหะแสดงโดย

$$\tau = \tau_{p0} \frac{n_0 + n_1 + \Delta n}{n_0 + p_0 + \Delta n} + \tau_{n0} \frac{p_0 + p_1 + \Delta n}{n_0 + p_0 + \Delta n} \quad (2.3)$$

เมื่อ  $n_0$  และ  $p_0$  คือ ความเข้มข้นของโฮล และอิเล็กตรอนในสภาพสมดุลความร้อน

$\Delta n$  ( $\Delta n = \Delta p$ ) คือ ความเข้มข้นพาหะส่วนเกิน

$$\tau_{p0} = (v_{thp} \sigma_p N_T)^{-1} \text{ และ } \tau_{n0} = (v_{thn} \sigma_n N_T)^{-1}$$

อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำกำลังประเภทไบโพลาร์ โดยปกติแล้วทำงานในโหมดสวิตชิง เมื่ออยู่ในสภาวะนำกระแส ในบริเวณดริฟต์เต็มไปด้วยพาหะส่วนเกินภายใต้เงื่อนไขการฉีดระดับสูง เงื่อนไขการฉีดระดับต่ำจะเกิดขึ้นเมื่อมีความหนาแน่นกระแสค่อนข้างน้อยเท่านั้น เมื่ออยู่ในสภาวะหยุดนำกระแส ความกว้างชั้นปลอดพาหะเกิดขึ้นที่รอยต่อพีเอ็น

ภายใต้เงื่อนไขการฉีดระดับสูง ( $\Delta n \gg n_0 + p_0, \Delta n \gg N_T$ ) อายุของพาหะการฉีดระดับสูง ( $\tau_H$ ) แสดงโดย

$$\tau_H = \tau_{n0} + \tau_{p0} = \frac{1}{N_T} \left( \frac{1}{v_{thn} \sigma_n} + \frac{1}{v_{thp} \sigma_p} \right) \quad (2.4)$$

ซึ่งจะเห็นว่าอายุของพาหะไม่ขึ้นกับระดับพลังงานของศูนย์กลาง แต่ขึ้นกับความเข้มข้นของศูนย์กลาง ( $N_T$ ) และ capture cross sections เท่านั้น

ในชั้นปลอดพาหะ ศูนย์กลางระดับลึกทำให้เกิดการเกิดใหม่ของพาหะ ซึ่งอัตราการเกิดใหม่ (G) แสดงโดย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$G = \frac{n_i^2}{(n_1 \tau_{p0} + P_1 \tau_{n0})} = \frac{n_i}{\tau_{sc}} \quad (2.5)$$

เมื่ออายุของพาหะในบริเวณปลอดประจุขึ้นอยู่กับตำแหน่งของระดับพลังงานกับดัก ( $E_T$ ) เนื่องจากตำแหน่งของระดับพลังงานนี้มีความสัมพันธ์กับตำแหน่งเฟอร์มิของสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ ( $E_i$ ) และมีค่าน้อยสุดเมื่อ ( $E_T$ ) และ ( $E_i$ ) ทับซ้อนกัน

$$\tau_{sc} = \tau_{p0} \exp\left(\frac{-(E_i + E_T)}{kT}\right) + \tau_{n0} \exp\left(\frac{-(E_i + E_T)}{kT}\right) \quad (2.6)$$

ศูนย์กลางการรวมตัวในซิลิคอนเกิดขึ้นได้จากอะตอมเจือปนของโลหะหนัก และจุดตำหนิ แต่ละชนิดของศูนย์กลางมีลักษณะสมบัติของระดับพลังงาน และ carrier capture cross sections ที่เป็นของตัวเอง ดังนั้น อายุของพาหะจึงถูกกำหนดโดยศูนย์กลางการรวมตัวที่มีอยู่ทั้งหมด

### 2.3 อิทธิพลของอายุของพาหะต่อลักษณะสมบัติของอุปกรณ์

ศูนย์กลางการรวมตัวมีอิทธิพลต่อทุกลักษณะสมบัติของอุปกรณ์ ทั้งลักษณะสมบัติสถานะหยุดนำกระแส, ลักษณะสมบัติสถานะนำกระแส และลักษณะสมบัติทรานเซียนท์ ระหว่างกระบวนการในสถานะนำกระแส และสถานะหยุดนำกระแส

ลักษณะสมบัติสถานะหยุดนำกระแส ของอุปกรณ์ทุกชนิด เป็นลักษณะสมบัติของรอยต่อที่เอ็น ณะได้รับไบอัสย้อนกลับ ดังนั้น ลักษณะสมบัตินี้มีจิงอิทธิพลจากการเกิดใหม่ของคู่อิเล็กตรอน-โฮล ในชั้นปลอดพาหะ[6] รวมถึงความหนาแน่นกระแสที่ไหลผ่านรอยต่อก็เกิดจากผลของกระบวนการนี้ เรียกว่า กระแสการเกิด-การรวมตัวใหม่ (generation-recombination current:  $I_{gen}$ ) ซึ่งขึ้นกับขนาดของแรงดันไบอัสย้อนกลับตลอดความกว้างของชั้นปลอดพาหะ ( $d$ ) แสดงดังนี้

$$J_{gen} = q \int_0^d G dx = \frac{qn_i d}{\tau_{sc}} \quad (2.7)$$

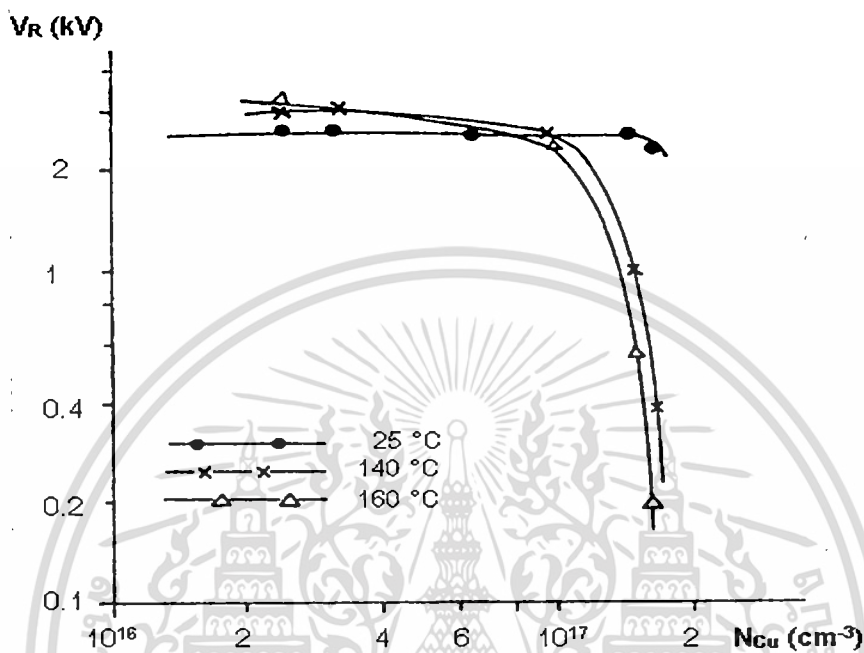
โดยความหนาแน่นกระแสรวม ( $J_R$ ) ที่ไหลผ่านรอยต่อที่ได้รับไบอัสย้อนกลับ เป็นผลรวมของ  $J_0$  และ

$J_{gen}$

$$J_R = n_i^2 q \left( \frac{D_n}{L_n} \frac{1}{p_{p0}} + \frac{D_p}{L_p} \frac{1}{n_{n0}} \right) + \frac{qn_i d}{\tau_{sc}} \quad (2.8)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

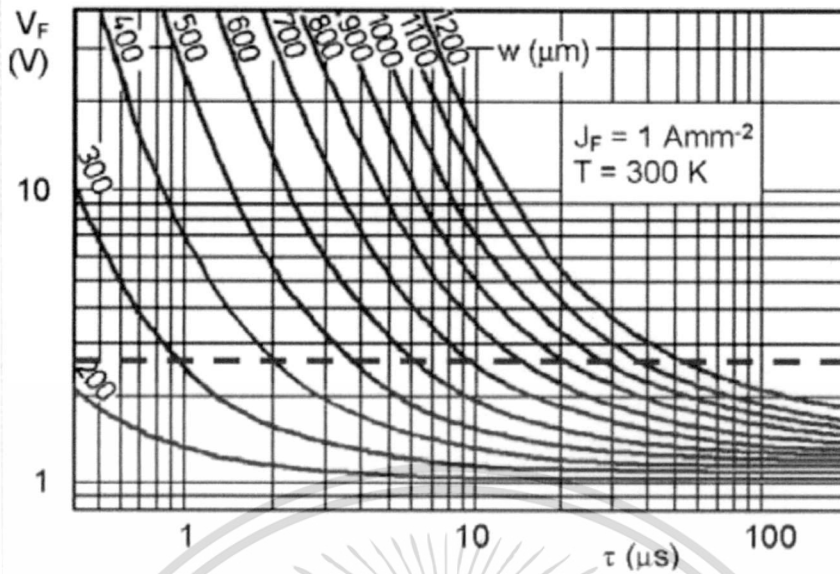
เพื่อให้กระแสย้อนกลับมีค่าน้อย ซึ่งจำเป็นต้องให้อายุของพาหะการเกิดมีค่าสูง ( $\tau_{sc}$ ) จากการวิเคราะห์ (2.6) พบว่าระดับพลังงานควรอยู่ห่างจากตำแหน่งของระดับเฟอร์มิในวัสดุอินทรีนซิก ( $E_i$ ) ซึ่งควรอยู่นอกส่วนกลางของแถบช่องว่างพลังงาน



รูปที่ 2.1 อิทธิพลของความเข้มข้นของทองแดงต่อลักษณะสมบัติด้านไบอัสย้อนกลับของไดโอดกำลัง

สิ่งเจือปนบางชนิดที่มีความเข้มข้นสูงอาจเกิดเป็นกลุ่มของสารประกอบระหว่างโลหะกับซิลิคอน ซึ่งอาจเป็นสาเหตุทำให้ลักษณะสมบัติด้านไบอัสย้อนกลับเลวลง ดังแสดงในรูปที่ 2.1 เป็นอิทธิพลความเข้มข้นของทองแดง (Cu) ที่มีต่อแรงดันย้อนกลับของไดโอดกำลังแบบซิลิคอน [7] พฤติกรรมเหล่านี้สามารถเกิดได้เช่นกันในกรณีของทอง (Au) และแพลตินัม (Pt)

ลักษณะสมบัติสถานะนำกระแสของอุปกรณ์ประเภทไบโพลาร์ ขึ้นอยู่กับอายุของพาหะเป็นอย่างมาก โดยเฉพาะอายุของพาหะในขณะฉีกระดับสูง (สมการ 2.4) เนื่องจากเงื่อนไขการฉีกระดับสูงเกิดขึ้นเมื่ออุปกรณ์อยู่ในสถานะนำกระแสปริมาณมาก ซึ่งการลดอายุของพาหะทำให้ความเข้มข้นของพาหะส่วนเกินลดลง และด้วยเหตุนี้แรงดันตกคร่อมในสถานะนำกระแสจึงเพิ่มขึ้น [2], [11] ตัวอย่างของความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันตกคร่อมไบอัสตรง และอายุของพาหะ ในไดโอดกำลัง แสดงในรูปที่ 2.2 ดังนั้น ค่าอายุของพาหะยาวเป็นสิ่งที่ปรารถนาได้จากกราฟนี้ ค่าแรงดันตกคร่อมสูงสุดที่ยอมรับได้จากเส้นประที่ขีด จากเส้นนี้สามารถหาอายุของพาหะน้อยสุดสำหรับอุปกรณ์แต่ละความหนาได้



รูปที่ 2.2 แนวโน้มตามทฤษฎีของอายุของพาหะ ต่อแรงดันตกคร่อมไบอัสตรงของไดโอดกำลังแบบ PIN กับตัวแปรของความหนาของบริเวณอินทรีนซิก[11]

ลักษณะสมบัติทรานเซียนท์ สำหรับอุปกรณ์สวิตช์ซึ่งมีความต้องการให้มีช่วงเวลาสภาวะนำกระแส และการหยุดนำกระแสสั้นๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งช่วงเวลากการหยุดนำกระแสขึ้นกับอายุของพาหะเป็นอย่างมาก เนื่องจากบริเวณปลอดประจุพาหะที่รอยต่อพีเอ็นจะเพิ่มขึ้นหลังการลดความเข้มข้นของพาหะไปสู่ค่าสมดุลความร้อนพลศาสตร์[2], [11], [15] ระหว่างกระบวนการทรานเซียนท์ของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำกำลัง อายุการมีระดับสูงควรได้รับการพิจารณาเป็นอย่างดี จากประเด็นนี้เองอายุของพาหะที่สั้นมากๆ เป็นสิ่งที่ต้องการสำหรับอุปกรณ์สวิตช์ซึ่งความเร็วสูง ในทางตรงข้าม การลดลงของอายุของพาหะมีผลให้ลักษณะสมบัติกระแสแรงดัน ในสถานะนำกระแสเลวลง เพราะฉะนั้นควรจะการเลือกทั้งโครงสร้าง และเทคโนโลยีที่ดีเพื่อจะได้ค่าที่ทั้งสองเหมาะสม

จากข้อมูลข้างต้นนี้ สามารถนำไปเลือกใช้ในการสร้างศูนย์กลางการรวมตัวที่เหมาะสมในการควบคุมอายุของพาหะ โดยสามารถสรุป ดังนี้

- ไม่ควรสร้างพลังงานระดับลิกลักกับแถบกลางช่องว่างพลังงาน
- ไม่ควรทำให้เกิดสารประกอบโลหะกับซิลิคอน
- ความเข้มข้นของศูนย์กลางควรง่ายต่อการควบคุม
- ควรจะมี capture crosssection ที่มากพอ และไม่ขึ้นกับอุณหภูมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ศูนย์กลางการรวมตัวควรกระจายอย่างสม่ำเสมอทั่วเต็มพื้นที่ของอุปกรณ์กำลัง เพื่อหลีกเลี่ยงความเหลื่อมล้ำเฉพาะที่ภายใต้เงื่อนไขด้านสเตติกส์ หรือด้านไดนามิกส์

ศูนย์กลางการรวมตัวบางชนิดที่ใช้ในการควบคุมอายุของพาหะแสดงดังแผนภาพ ในรูปที่ 2.3

Au	Pt	Pd	Ir	e <sup>-</sup>	H <sup>+</sup>	He <sup>++</sup>	
	<u>0.19</u>	<u>0.22</u>	<u>0.28</u>	<u>0.16</u> <u>0.23</u>	<u>0.17</u> <u>0.24</u> <u>0.30</u>	<u>0.17</u> <u>0.25</u>	W <sub>c</sub>
	<u>0.32</u>	<u>0.37</u>		<u>0.42</u>	<u>0.41</u>	<u>0.41</u>	W <sub>i</sub>
<u>0.54</u>			<u>0.55</u> <u>0.47</u>				
<u>0.36</u>	<u>0.42</u>	<u>0.32</u>		<u>0.36</u>	<u>0.37</u>	<u>0.36</u>	
	<u>0.26</u>				<u>0.26</u>		W <sub>v</sub>

รูปที่ 2.3 ระดับพลังงานที่เกิดขึ้นในแถบช่องว่างพลังงานของซิลิคอนที่เหมาะสมสำหรับการลดอายุของพาหะ

## 2.4 เทคนิคสำหรับการลดค่าอายุของพาหะ

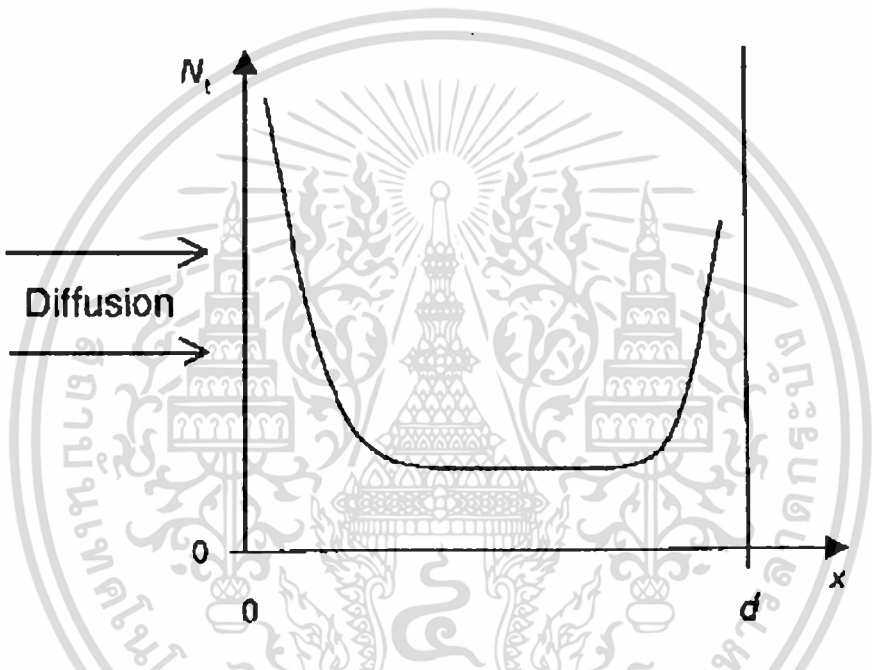
ในหลายเหตุการณ์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเพื่อให้อุปกรณ์ทำงานที่ความถี่สูง การลดอายุของพาหะมีความสำคัญมาก อย่างเช่น ประจุไฟฟ้าพื้นตัวกลับ และเวลาสภาวะหยุดนำกระแส ในอุปกรณ์ที่ต้องการพื้นตัวกลับแบบช้า (soft reverse recovery) ความลาดชันอายุของพาหะแกนกลางที่เหมาะสมทำให้ลักษณะรูปคลื่นแรงดันระหว่างกระบวน สภาวะหยุดนำกระแสดีขึ้นได้ [16] ในเทคโนโลยีการสร้างอุปกรณ์กำลัง อายุของพาหะที่ลดลงโดยการนำประสิทธิภาพของศูนย์กลางการรวมตัวมาใช้ ทั้งการแพร่อะตอมสารเจือโลหะหนัก อย่างเช่น ทอง[18] และ แพลตินัม[1] หรือโดยการฉายรังสีซึ่งมีพลังงานสูง ในทั้งสองกรณีนี้ โดยปกติแล้วจะทำการเป็นขั้นตอนท้ายสุดของลำดับกระบวนการสร้าง

### 2.4.1 เทคนิคการแพร่

การลดอายุของพาหะโดยการแพร่ทองถูกนำมาใช้เป็นแล้วกว่า 40 ปี การแพร่ทอง[18] ทั่วไปอยู่ในช่วงอุณหภูมิระหว่าง 800 ถึง 1000 °C โดยการเคลือบแผ่นผลึกด้วยฟิล์มบางของทองจากการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระเหยไอ หรือการสเป็คเตอร์ หรือจากสารละลาย  $AuCl_3$  ท่องแพร่เร็วมากในซิลิคอนโดยกลไกการแพร่ตัวระหว่าง-การแทนที่อะตอม และ แสดงลักษณะของปริมาณความเข้มข้น(concentration profile)ต่างจากการวัดปริมาณอะตอมสารเจือตามลักษณะการกระจายตัวแบบ error function หรือ Gaussian เหมือนดังในการแพร่โบรอน(B) ฟอสฟอรัส(P) อลูมิเนียม(Al) อาเซนิค(As) หรือ แกลเลียม(Ga) เป็นอย่างมาก ผลจากการวัดปริมาณการเติมอะตอมสารเจือมีรูปร่างเป็นตัวยู (U-shape) ดังแสดงในรูปที่ 2.4 ซึ่งความเข้มข้นสูงจะอยู่ที่บริเวณผิวหน้าทั้งสองของแผ่นผลึก และส่วนกลางแบนราบ



รูปที่ 2.4 ปริมาณการแพร่ที่มีรูปร่างเป็นตัวยูของอะตอมสารเจือระดับลึกเพื่อใช้ลดอายุของพาหะ

ข้อเสียของทองที่ใช้เป็นศูนย์กลางการรวมตัว คือพลังงานระดับลึกที่เห็นผลอยู่ใกล้กับศูนย์กลางช่องว่างพลังงานมาก ดังแสดงในรูปที่ 2.3 เพราะฉะนั้นอุปกรณ์ที่เติมทองมีกระแสรั่วสูงมาก แพลตินั่มจึงเป็นอีกตัวเลือก[19] เนื่องจากระดับพลังงานของแพลตินั่มอยู่ไกลออกไปจากศูนย์กลางช่องว่างพลังงาน ดังแสดงในรูปที่ 2.3 กระแสรั่วจึงลดลงได้ ในการเคลือบแพลตินั่ม แผ่นผลึกจะถูกเคลือบด้วย spin-on

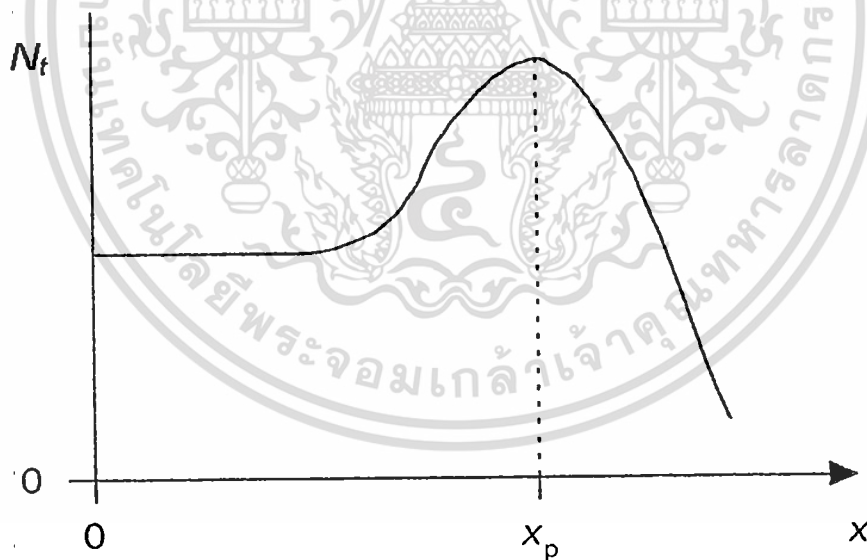
ถึงแม้ว่าการแพร่อะตอมสารเจือปนเพื่อลดอายุของพาหะดูเหมือนไม่ยุ่งยาก และไม่ต้องการการควบคุมที่แม่นยำ แต่อาจเกิดลักษณะพิเศษขึ้นในบริเวณที่ความหนาแน่นของตำหนิสูงกว่า และด้วยเหตุนี้จากก่อให้เกิดทั้งการกระจายตัวของอายุพาหะไม่เป็นเอกรูป และการเกิดจุดร้อน (hot spot)ได้ ตัวอย่างของการกระจายตัวที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกันของทองหลังการแพร่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพราะฉะนั้น เพื่อควบคุมอายุของพาหะที่แม่นยำในอุปกรณ์ควบคุมแรงดัน การยิงประจุจึงถูกนำ มาใช้หลังจากการแพร่พลติซึม หรือทอง [24]. แต่การแพร่สารเจือปนเพื่อลดอายุของพาหะให้เสร็จก่อนกระบวนการสร้างขั้วโลหะ จึงไม่สามารถตรวจสอบลักษณะสมบัติของอุปกรณ์ทั้งก่อน และ หลังการเติมสารเจือได้

#### 2.4.2 เทคนิคการฉายรังสี

อนุภาคพลังงานสูงทะลุผ่านเข้าไปโครงสร้างของผลึก พลังงานเหล่านั้นเกิดการสูญเสียจากการทำปฏิกิริยากับโครงสร้างอะตอม ซึ่งทำให้เกิดการย้ายตำแหน่งไปจากเดิมที่เคยอยู่ และเกิดเป็นตำหนิตำแหน่งว่างเหล่านี้เป็นได้ทั้งตำแหน่งว่างคู่, คู่ตำแหน่งว่างกับสารเจือปน, การแทรกโครงสร้างอะตอม และส่วนประกอบของตำแหน่งว่างสารเจือปนกับการแทรกโครงสร้างอะตอม ทั้งหมดนี้นำไปสู่การเกิดศูนย์กลางการรวมตัวในซิลิคอนได้ รังสีของอิเล็กตรอน, โปรตอน, อัลฟา, และแกมมา สามารถนำมาใช้ในเทคนิคนี้โดยมีผลต่ออายุของพาหะ[26]. ระดับลึกที่เกิดจากการฉายรังสี แสดงในรูปที่ 2.3 แผนผังแสดงความสัมพันธ์การกระจายตัวความเสียหายของโครงสร้างผลึกกับความลึกหลังจากการฉายรังสีอนุภาคพลังงานสูงแสดงในรูปที่ 2.5 ซึ่งแสดงตัวอย่างการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของตำหนิตำแหน่งว่างกับความลึกได้มีพิกัด



รูปที่ 2.5 แผนผังความสัมพันธ์การกระจายตัวความเสียหายของโครงสร้างผลึก กับความลึกหลังจากการฉายรังสีอนุภาคสูง

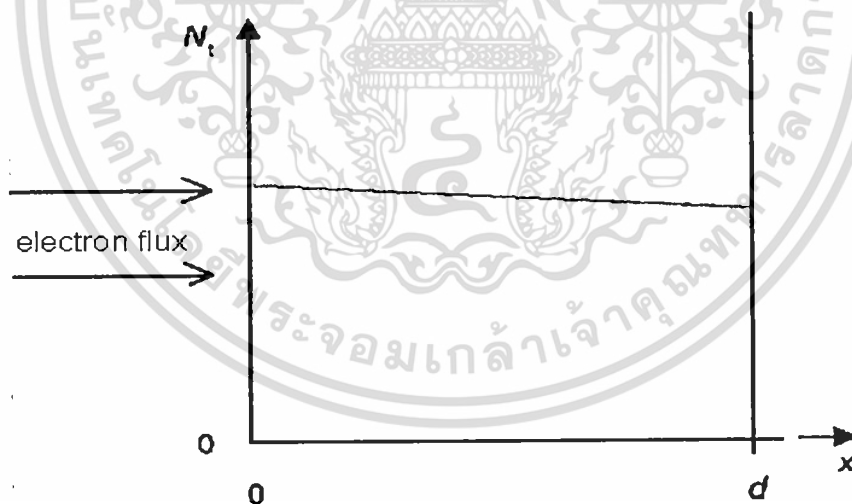
ความลึก  $x_p$  มีค่าสูงสุด และความลึกที่ทะลุผ่านได้ เป็นฟังก์ชันกับมวล และพลังงานของอนุภาค สำหรับการให้พลังงาน ความลึกการทะลุผ่านโดยประมาณจะแปรผกผันกับมวลของอนุภาค

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความเสียหายจากรังสีโดยส่วนใหญ่อยู่ในช่วงท้ายสุดของช่วงอนุภาค ซึ่งสังเกตได้จากรูปที่ 2.5 ตำหนิบางส่วนที่เกิดจากการฉายรังสีมีลักษณะไม่เสถียร และอาจถูกแอนนิลไกล์กับอุณหภูมิการทำงานของอุปกรณ์ ซึ่งนำไปสู่การเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์อันไม่ต้องการได้ ดังนั้นอุปกรณ์จึงถูกแอนนิลที่อุณหภูมิ 250 °C ถึง 300 °C เป็นเวลาหลายชั่วโมง หลังการฉายรังสีเพื่อให้แน่ใจว่าการทำงานในระยะยาวมีเสถียรภาพ

**รังสีแกมมา** สามารถทะลุผ่านได้ลึกมาก จึงสามารถใช้ลดอายุของพาหะได้หลังจากอุปกรณ์ถูกสร้างโลหะ และเก็บบรรจุแล้ว อย่างไรก็ตาม อาจทำให้เกิดความเสียหายต่อผิวหน้าจุดเชื่อมของรอยต่อพีเอ็น และทำให้ลักษณะสมบัติการทนแรงดันย้อนกลับลดลง

**การฉายรังสีอิเล็กตรอน** ซึ่งถูกใช้อย่างแพร่หลาย หลังจากกระบวนการสร้างโลหะ แต่ทำก่อนการเก็บบรรจุ อุปกรณ์จะถูกบอมบาร์ดด้วยอิเล็กตรอนที่มีพลังงานหลาย MeV ซึ่งทะลุผ่านซิลิคอนเข้าไปลึกหลายมิลลิเมตร (ตัวอย่างเช่น > 6 mm เมื่ออิเล็กตรอนพลังงาน 3 MeV) และเกิดตำหนิเป็นเนื้อเดียวกัน ทัวทั้งโครงสร้างอุปกรณ์ ดังแสดงในรูปที่ 2.6 ความเข้มข้นของระดับลึกแปรผันกับปริมาณรังสี (radiation dose/ $\Phi$ ) ที่ใช้ ด้วยเหตุนี้อายุของพาหะจึงขึ้นกับปริมาณรังสี



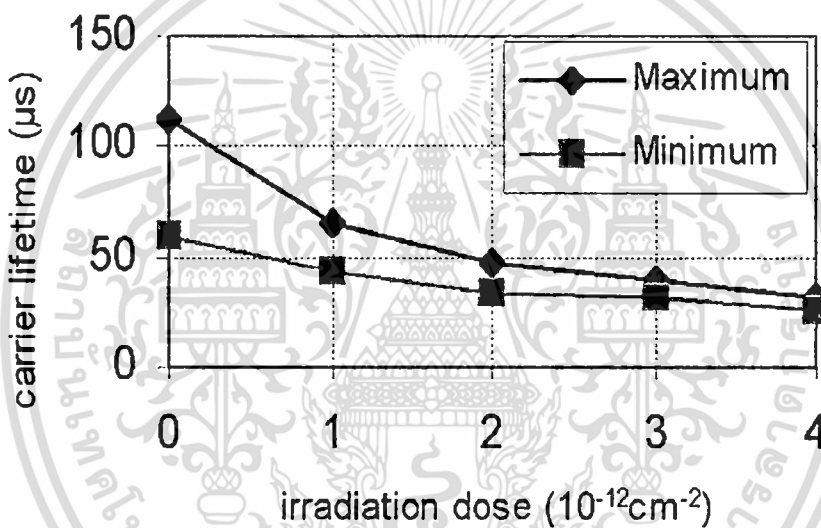
รูปที่ 2.6 การกระจายของศูนย์กลางการรวมตัวที่เกิดจากการฉายรังสีอิเล็กตรอนพลังงานสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\tau = \frac{\tau_0}{1 + \tau_0 K \Phi} \quad (2.9)$$

เมื่อ  $\tau_0$  คือ อายุของพาหะก่อนฉายรังสี และ  $K$  เป็นตัวแปรสมมุติแทนปัจจัยความเสียหาย ผลการทำซ้ำจากกระบวนการนี้ดีเยี่ยม เนื่องจากปริมาณรังสีที่ฉายสามารถตรวจดูได้อย่างแม่นยำ

การฉายรังสีอิเล็กทรอนิกส์ถูกใช้บ่อยครั้งเพื่อทำให้เกิดเนื้อเดียวกันของการกระจายตัวของอายุพาหะในอุปกรณ์ที่มีพื้นที่ใหญ่ รูปที่ 2.7 แสดงตัวอย่างการเปลี่ยนแปลงการกระจายตัวของอายุพาหะ กับการฉายรังสีอิเล็กทรอนิกส์



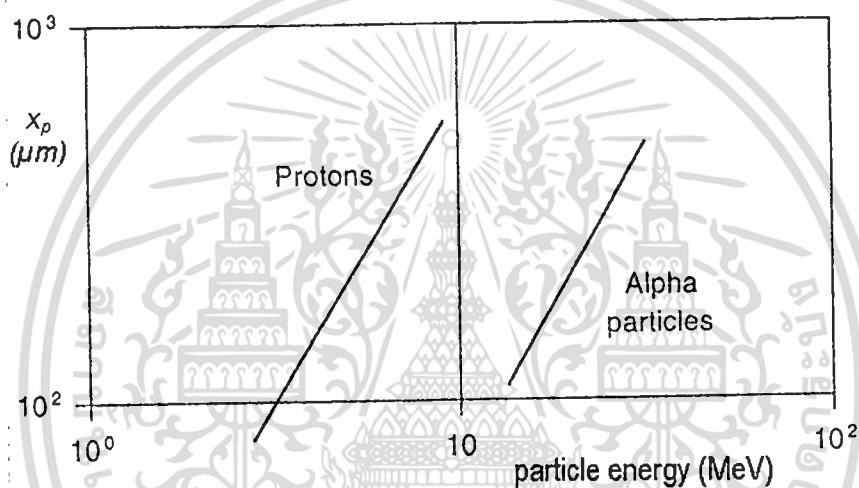
รูปที่ 2.7 ตัวอย่างการเปลี่ยนแปลงการกระจายตัวของอายุพาหะขึ้นกับปริมาณการฉายรังสีอิเล็กทรอนิกส์

ซึ่งการใช้ปริมาณการฉายรังสีมากขึ้นอายุของพาหะการลดลงเป็นไปตาม (2.9) และมีการกระจายของอายุพาหะน้อยลง ในทางตรงข้าม การกระจายเป็นเนื้อเดียวกันของอายุพาหะในปริมาตรของอุปกรณ์อาจจะไม่ได้ค่าเหมาะสมที่สุดสำหรับการเลือกทั้งพารามิเตอร์ด้านสแตติกส์ และไดนามิกส์ในคราวเดียวกัน ปริมาณรังสีที่สูงเกินไปทำให้พารามิเตอร์ของอุปกรณ์ที่ใช้ควบคุมแรงดัน เช่น MOSFET และ IGBT กำลัง เลวลงได้[28]

**การฉายรังสีโปรตอน และอัลฟา** โปรตอน [29] มีความลึกการทะลุผ่านสั้นกว่าอิเล็กตรอนมาก ยังเปลี่ยนแปลง และเป็นฟังก์ชันกับพลังงานของอนุภาคจากจำนวนไม่มากไปถึงหลายหนึ่งร้อยไมครอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การฉายรังสีด้วยอนุภาคอัลฟา[30]โดยใช้ไอออนของ  $He^{++}$  ทำให้เกิดผลเหมือนกับการบอมบาร์ดของโปรตอน เนื่องจากมีมวลมากกว่า จึงจำเป็นต้องใช้พลังงานของอนุภาคที่สูงกว่า (โดยทั่วไป~10 MeV) เพื่อให้มีความลึกการทะลุผ่านเท่าเดิม ความลึกการทะลุผ่านของโปรตอน และ  $He^{++}$  ในซิลิคอนเป็นฟังก์ชันของพลังงาน ดังแสดงในรูปที่ 2.8 มีการเพิ่มขึ้นของความเสียหายจากรังสีที่ส่วนปลายของช่วงพลังงาน อายุของพายุเกิดการลดในช่วงแคบๆ ของโครงสร้างใต้ผิวหน้า ซึ่งถูกควบคุมด้วยพลังงานการบอมบาร์ด [31] ด้วยวิธีการนี้สามารถเลือกความเหมาะสมระหว่างพารามิเตอร์ด้านสเตติกส์ และไดนามิกส์ ของอุปกรณ์ได้ ระดับกับดักที่ส่วนใหญ่เกิดจากเคลื่อนที่ส่วนประกอบที่ว่าง แต่อาจเกิดจากการยิงไฮโดรเจนได้เช่นกัน ดังในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.8 ความลึกการทะลุผ่านของไอออน  $H^+$  และ  $He^{++}$  ในผลึกของซิลิคอนเป็นฟังก์ชันของพลังงาน

ทั้งการฉายรังสีโปรตอน และอัลฟาต้องอยู่ในสุญญากาศทำให้ค่าใช้จ่ายของเครื่องมือสูง อย่างไรก็ตามเทคนิคนี้สามารถทำให้อายุของพายุลดลงได้ในบางส่วนของโครงสร้างอุปกรณ์ และยังใช้เป็นเครื่องมือเลือกความเหมาะสมของพารามิเตอร์ที่มีประสิทธิภาพสูงมาก การใช้เทคนิคนี้ในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงถูกจำกัดจากการเติมสารเจือแบบตื้น(shallow doping) [32] เนื่องจากทั้งไฮโดรเจน และฮีเลียม อาจก่อให้เกิดผลเสียต่อการทนแรงดันของอุปกรณ์กำลังได้ ถ้าหากเลือกความถี่การฉายรังสีสูงหรือเงื่อนไขการแอนนิลผิดพลาดไป

### 2.4.3 การรวมหลายเทคนิคเข้าด้วยกัน

การได้ซึ่งลักษณะปริมาณของศูนย์กลางการรวมตัวที่ดี สามารถนำเทคนิคที่อภิปรายที่ผ่านมาข้างบนมาใช้รวมกัน ซึ่งเป็นไปได้ที่จะรวมเอาการฉายรังสีไอออนมวลเบา( $H^+$  หรือ  $He^{++}$ ) กับการฉายรังสีอิเล็กตรอนเข้าด้วยกันเพื่อยับยั้งไดนามิกส์อะวาลานซ์ระหว่างการฟื้นตัวกลับอย่างรวดเร็วของไดโอด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำลัง การเปลี่ยนแปลงปริมาณของสารเชื้อโรคการแพร่เร็ว โดยการฉายรังสีอนุภาคพลังงานสูงก่อนการแพร่นำเสนอใน[33] การควบคุมอายุเฉพาะที่โดยใช้การแพร่เพลิงต้นมหลังการฉายรังสีไอออนมวลเบาถูกศึกษาโดย[34] และการควบคุมอายุเฉพาะที่โดยเพิ่มการแพร่เพลิงเดิมโดยตำหนิที่เกิดจากรังสีถูกนำมาใช้ใน[35] วิธีเหล่านี้ทำให้เกิดเครื่องมือใหม่ๆ สำหรับการปรับปรุงลักษณะศูนย์กลางการรวมตัว และส่งผลมาถึงการปรับปรุงพารามิเตอร์ และความน่าเชื่อถือของอุปกรณ์ด้วย



### บทที่ 3

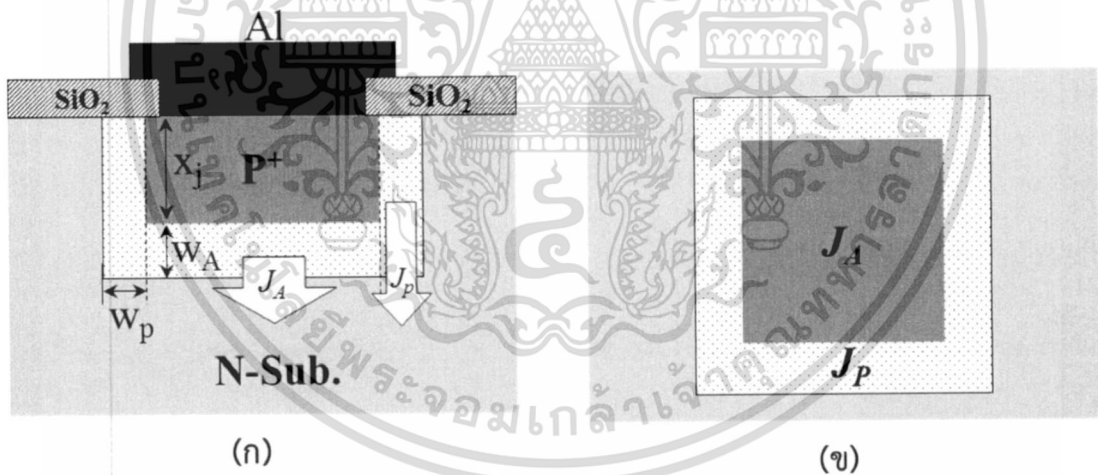
## การออกแบบ กระบวนการสร้าง และการวัดคุณลักษณะทางไฟฟ้า

### 3.1 การออกแบบอุปกรณ์

จากทฤษฎีซิลิคอนไดโอดแบบรอยต่อพี-เอ็น ส่วนประกอบกระแสของรอยต่อพี-เอ็น [39] ประกอบด้วย กระแสที่ไหลผ่านพื้นที่หน้าตัด ( $J_A$ ) และกระแสที่ไหลบริเวณขอบ ( $J_P$ ) ของไดโอด ดังแสดงในรูปที่ 3.1 จากส่วนประกอบกระแสทั้งหมด สามารถเขียนได้ ดังสมการ

$$I = I_A + I_P = AJ_A + PJ_P \quad (3.1)$$

จากความสัมพันธ์นี้ ค่าความชันเชิงเส้นระหว่าง  $I/P$  และ  $A/P$  สามารถหาส่วนประกอบของความหนาแน่นกระแสพื้นที่หน้าตัด ( $J_A$ ) ในขณะที่ค่าความชันเชิงเส้นระหว่าง  $I/A$  และ  $P/A$  สามารถหาส่วนประกอบของความหนาแน่นกระแสไหลบริเวณขอบรอยต่อ ( $J_P$ ) ของไดโอดได้



รูปที่ 3.1 แผนผังแสดงส่วนประกอบกระแสของไดโอด (ก) ภาคตัดขวาง (ข) ด้านบน

การวัดลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันไฟฟ้า และความจุ-แรงดันไฟฟ้า ของไดโอดที่มีลักษณะรูปทรงเลขาคณิต ทั้งขนาดพื้นที่หน้าตัด ( $A$ ) และความยาวรอบรูป ( $P$ ) ต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 3.1 ทั้งนี้เพื่อการแยกส่วนประกอบ และวิเคราะห์กระแสที่ไหลผ่านไดโอด จากตารางที่ 3.1 จะเห็นได้ว่า ไดโอดถูกออกแบบให้ขนาดพื้นที่หน้าตัด และความยาวรอบรูปที่ต่างกัน โดยโครงสร้างแรกเป็นแบบ

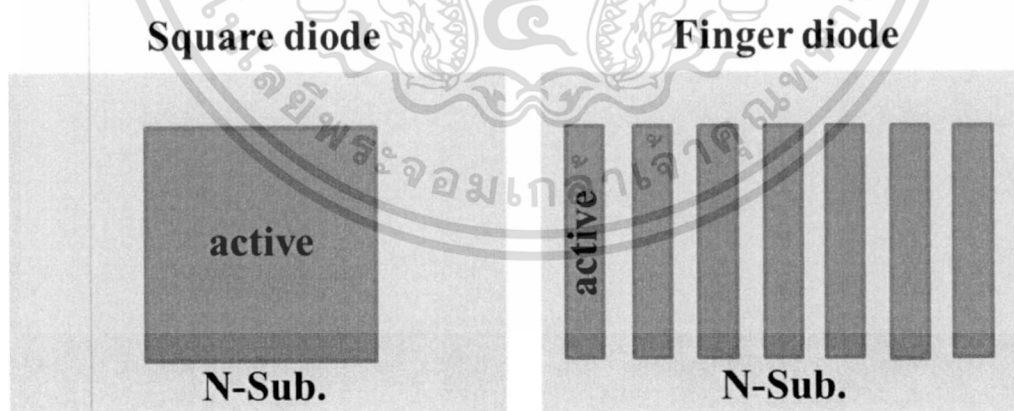
สี่เหลี่ยมจัตุรัส (SQ) และแบบที่สองไดโอดที่มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมพื้นผ้า (FG) หลายอันต่อข้างถึงกัน ดังแสดงในตารางที่ 3.2 เป็นภาพมุมมองด้านบนของโครงสร้างทดสอบ เพื่อสำหรับหาค่าตัวแปร

ตารางที่ 3.1. เปรียบเทียบลักษณะไดโอดที่มีรูปทรงเลขาคณิตต่างกัน

( $A$  คือ พื้นที่หน้าตัด,  $P$  คือ ความยาวรอบรูป และ  $N_c$  เป็นจำนวนมุม)

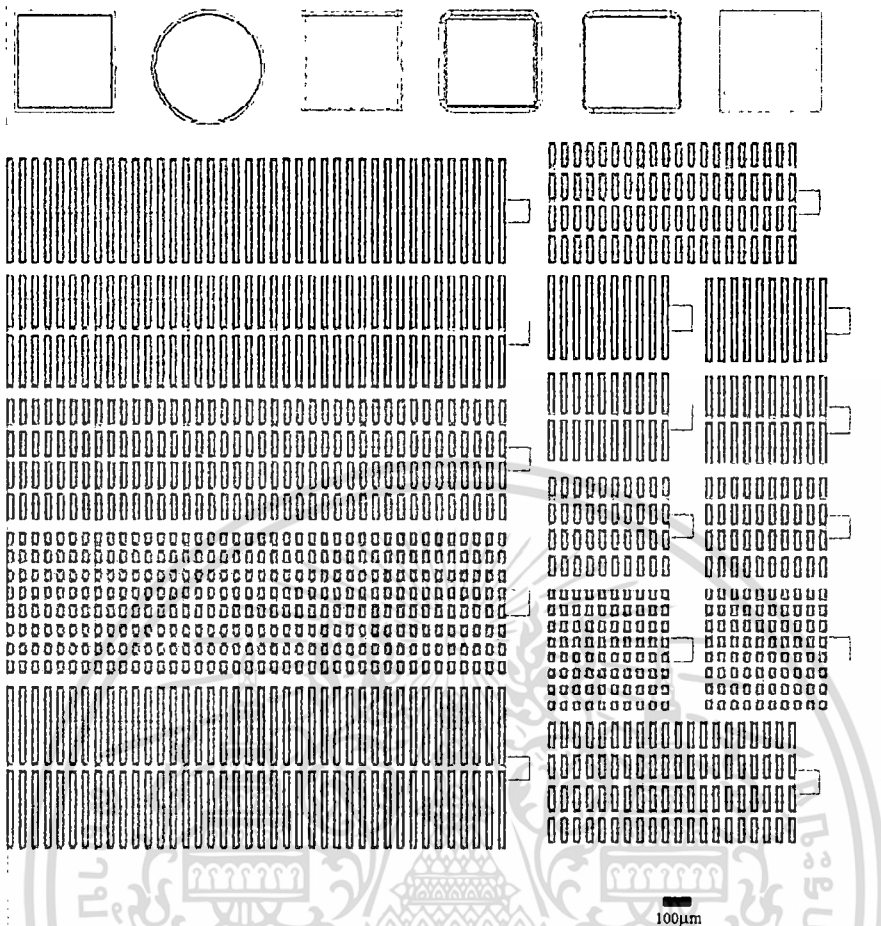
Diode	Structure [WxL]xN	Area [A](cm <sup>2</sup> )	Perimeter [P](cm)	Corner [N <sub>c</sub> ]	P/A (cm <sup>-1</sup> )
SQ	[400μm x 400μm] x 1	0.0016	0.16	4	100
FG1	[30μm x 334μm] x 10	0.0010	0.728	40	728
FG2	[30μm x 167μm] x 20	0.0010	0.788	80	788
FG3	[30μm x 84μm] x 40	0.0010	0.912	160	912
FG4	[30μm x 42μm] x 80	0.0010	1.152	320	1152

หลังจากได้ทำการคำนวณ และออกแบบลักษณะของโครงสร้างทดสอบใน เพื่อสำหรับหาค่าตัวแปรแล้ว จะนำข้อมูลเหล่านั้นไปทำการสร้าง layout ของโครงสร้างไดโอดที่ผ่านการออกแบบด้วยโปรแกรม L-Edit แสดงดังในรูปที่ 3.3 ทั้งนี้เพื่อนำ layout ที่ออกแบบนี้ไปสร้างเป็นกระจกต้นแบบ สำหรับใช้ในกระบวนการสร้างอุปกรณ์ด้วยเทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ ต่อไป



รูปที่ 3.2 ลักษณะของโครงสร้างทดสอบ เพื่อสำหรับหาค่าตัวแปร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 ลักษณะ layout ของโครงสร้างไดโอดที่ผ่านการออกแบบด้วย L-Edit

### 3.2 เทคโนโลยีกระบวนการสร้าง

การสร้างอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำบนฐานรองซิลิคอน มีกระบวนการที่สำคัญหลักๆ อยู่ 5 กระบวนการด้วยกัน ได้แก่

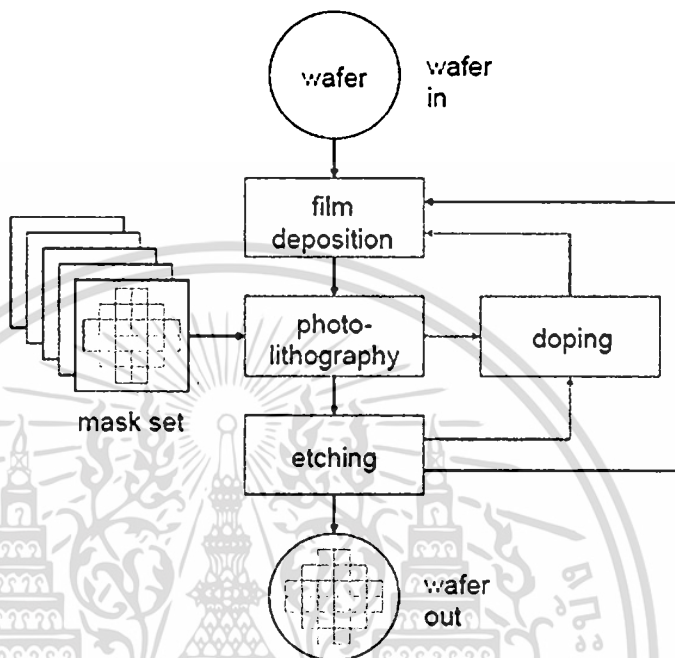
- การปลูกฟิล์มบาง
- กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี
- การกัดชั้นวัสดุ
- การเติมอะตอมสารเจือ
- การสร้างชั้นออกไซด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.4 จะเห็นได้ว่าในกระบวนการสร้างอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำด้วยเทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ ไม่ว่าจะอุปกรณ์เหล่านั้นจะมีขั้นตอนการสร้างมากน้อยเพียงใด แต่กระบวนการยังคงเกิดจากการทำซ้ำของ 5 กระบวนการนี้เท่านั้น

### Principal Steps

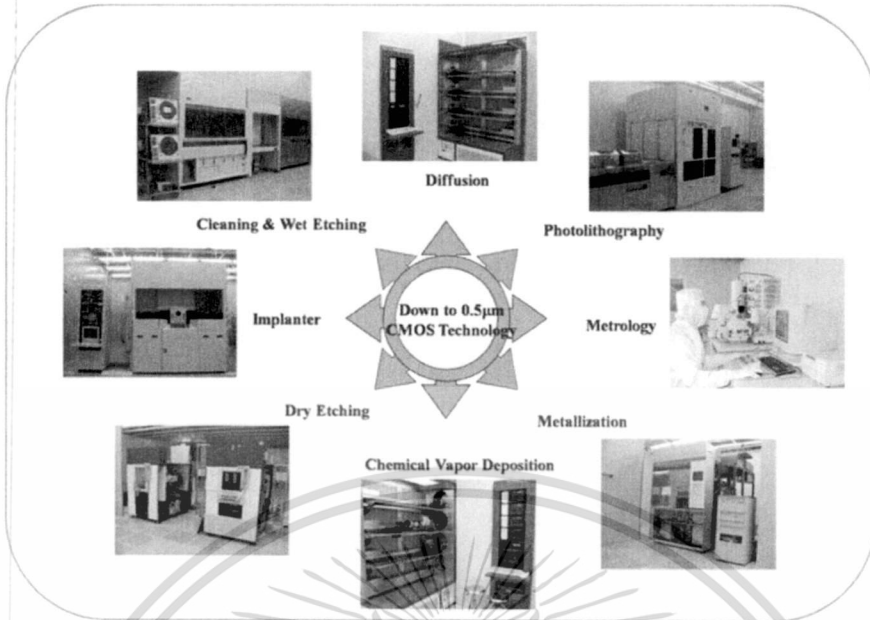
- Film Deposition
- Photolithography
- Etching
- Doping
- Thermal Oxidation



รูปที่ 3.4 เทคโนโลยีกระบวนการสร้างอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ

งานวิจัยนี้ได้ทำการสร้างซิลิคอนไดโอดโครงสร้าง PIN .ในการศึกษา และทดลองต่างๆ โดยกระบวนการทั้งหมด ทำที่ศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์(TMEC) ซึ่ง TMEC มีความพร้อมในการผลิตวงจรรวม หรือไอซีโดยใช้เทคโนโลยีซีมอส (CMOS) ขนาด 0.8 ไมครอน ในระดับของห้องปฏิบัติการ และได้รับการอนุมัติงบประมาณปี 2550 ในการปรับปรุงโครงสร้างพื้นฐาน และจัดหาเครื่องจักรเพิ่มเติม เพื่อรองรับกระบวนการผลิตที่ได้มาตรฐาน และมีเสถียรภาพที่จะพัฒนาขึ้น จากเทคโนโลยีกระบวนการผลิตมาตรฐานนี้สามารถนำไปสู่การวิจัย และพัฒนา Power diode ได้เป็นอย่างดี ในรูปที่ 3.5 แสดงเครื่องจักรที่ใช้ในการสร้างอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ ของ TMEC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.5 เครื่องจักรที่ใช้ในการสร้างอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ ของศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์

### 3.3 ขั้นตอนกระบวนการสร้าง

การสร้างซิลิคอนไดโอดแบบ PIN เพื่อการศึกษาผลของการแพร่แพลตตินัม ซึ่งแสดงขั้นตอนการสร้างอย่างง่ายตามในตารางที่ 3.2 เริ่มจากแผ่นผลึกเริ่มต้นชนิด FZ-NTD (Neutron Transmutation Doping)  $N^+N^+$  (111), มีสภาพความต้านทาน  $60 \Omega \cdot \text{cm}$  หนา  $60 \mu\text{m}$ , ชั้น  $N^+$  หนา  $240 \mu\text{m}$  มีความหนาแน่นอะตอม  $1.0 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$  ยิ่งประจุโบรอน พลังงาน  $60 \text{ keV}$ , ความหนาแน่น  $1.0 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$  สำหรับสร้างรอยต่อ  $p^+n$  จากนั้นทำการแพร่ด้วยอะตอมของแพลตตินัมที่อุณหภูมิ  $850$  และ  $900 \text{ }^\circ\text{C}$  ใช้เวลาการแพร่  $120$  นาที ตามลำดับ เสร็จแล้วสร้างขั้วโลหะอลูมิเนียมให้กับไดโอดเพื่อนำไปทดสอบลักษณะสมบัติทางไฟฟ้า และหาค่าตัวแปรทางฟิสิกส์ ต่อไป ตัวอย่างของแผ่นผลึกซิลิคอนไดโอดแบบ PIN ที่ผ่านกระบวนการสร้างเสร็จ แสดงในรูปที่ 3.6

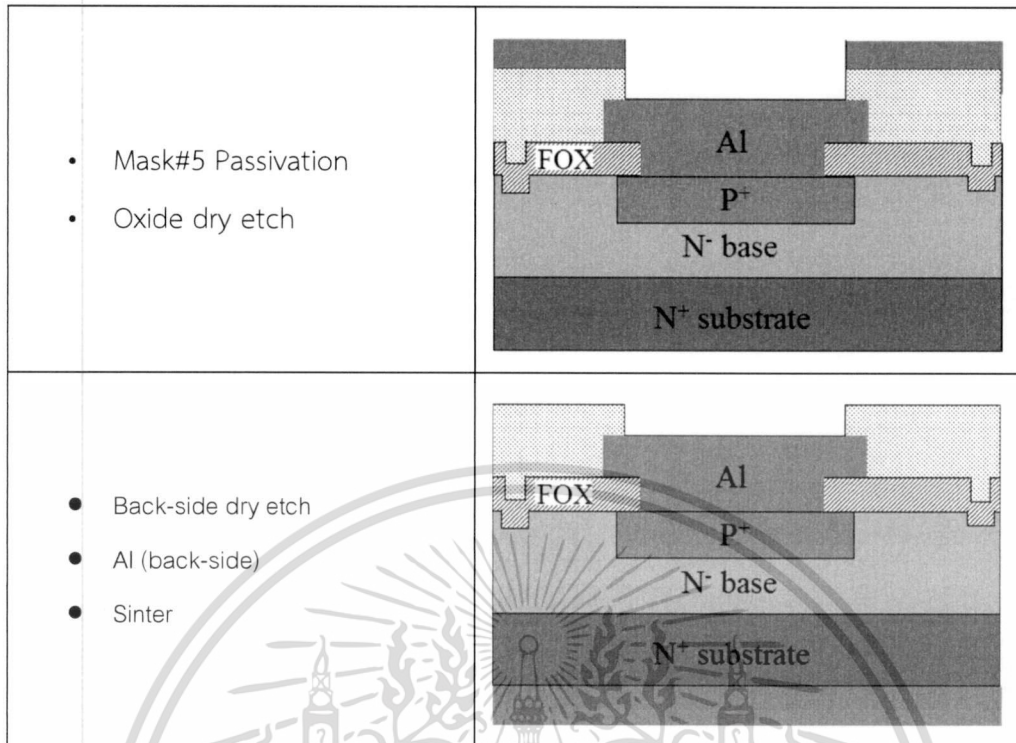
ตารางที่ 3.2. แสดงขั้นตอน การสร้างอย่างง่ายของไดโอดโครงสร้าง PIN

Process step	Picture
<ul style="list-style-type: none"> <li>Mask#1 Alignment</li> <li>Si dry etch</li> </ul>	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<ul style="list-style-type: none"> <li>• Screening oxide</li> <li>• Mask#2 Anode</li> <li>• P<sup>+</sup> anode implantation (B<sup>+</sup> ion)</li> </ul>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Anode annealing</li> <li>• PECVD Field oxide(FOX)</li> <li>• Platinum(Pt) coating</li> <li>• Pt diffusion</li> </ul>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mask#3 contact</li> <li>• Contact dry etch</li> </ul>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Al deposition</li> <li>• Mask#4 Al pattern</li> <li>• Al dry etch</li> </ul>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Passivation layer</li> </ul>	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

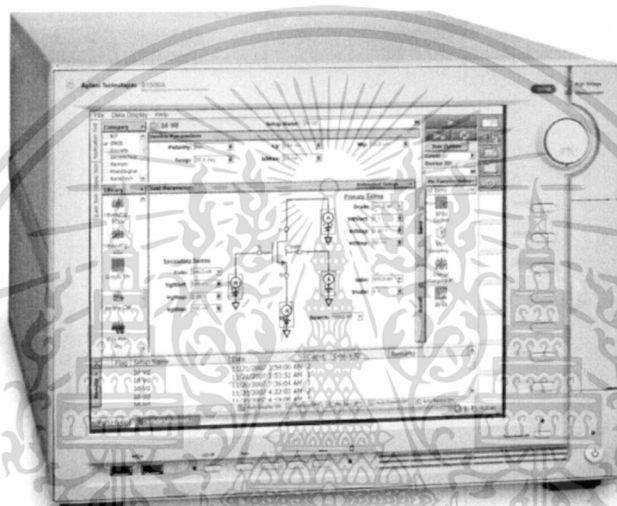


รูปที่ 3.6 ตัวอย่างของแผ่นผลึกซิลิคอนไดโอบแบบ PiN ที่ผ่านกระบวนการสร้างเสร็จแล้ว

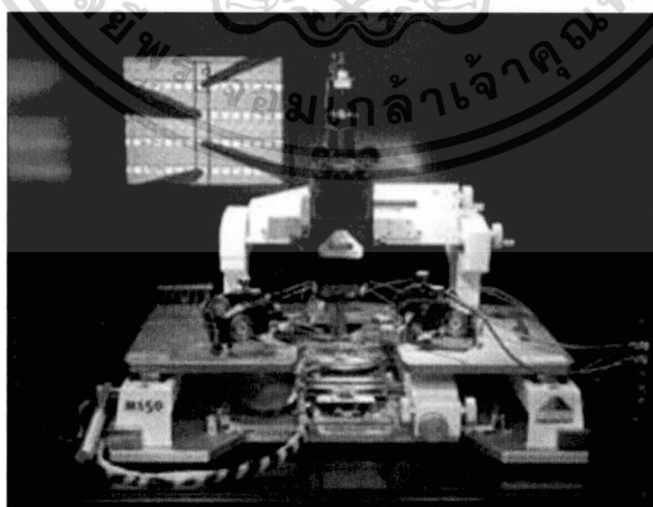
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4 วิธีการวัดคุณลักษณะทางไฟฟ้า

การศึกษานี้จะทำการวัดลักษณะสมบัติไดโอดขณะได้รับแรงดันไบอัสตั้งแต่ -5 ถึง 2 V ภายใต้อุณหภูมิการวัด 27 ถึง 147 °C สำหรับความถี่ที่ใช้ในการวัดค่าความจุไฟฟ้านั้น ใช้ที่ 100 kHz โดย การวัดลักษณะสมบัติ ทั้งกระแส-แรงดันไฟฟ้า และความจุ-แรงดันไฟฟ้า ใช้เครื่องวิเคราะห์คุณลักษณะของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ Agilent รุ่น B1500A สำหรับเชื่อมวัดใช้ Cascade Microtech Model M 150 ซึ่งมี ERS Aircool SP72-300 thermo chuck เป็นตัวควบคุมอุณหภูมิฐานรอง ดังแสดงในรูปที่ 3.7 และ 3.8 ตามลำดับ ส่วนผลทดลองและอภิปราย จะกล่าวต่อไป



รูปที่ 3.7 เครื่องวิเคราะห์คุณลักษณะของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ Agilent รุ่น B1500A



รูปที่ 3.8 Cascade Microtech Model M 150 มี ERS Aircool SP72-300 thermo chuck

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

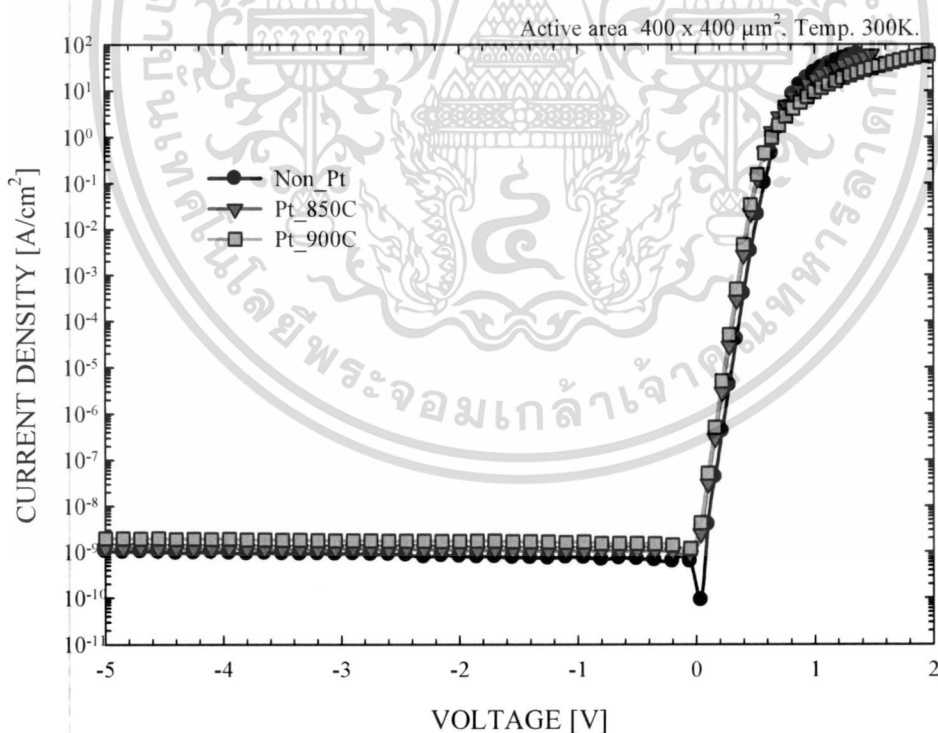
## บทที่ 4

### ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการนำเสนอลักษณะสมบัติทางไฟฟ้า และการวิเคราะห์ความถดถอยของ ซิลิคอนไดโอดแบบ PiN หลังผ่านการเติมด้วยอะตอมแพลตินัม โดยทำการเปรียบเทียบกับไดโอดที่ไม่เติมอะตอมแพลตินัม ทำการศึกษาผลของอะตอมแพลตินัม ที่มีต่อพฤติกรรมซิลิคอนไดโอดแบบ PiN และสามารถใช้ในการอธิบายปรากฏการณ์ และกลไกที่เกิดขึ้นกับซิลิคอนไดโอดกำลังแบบ PiN ต่อไป

#### 4.1 คุณลักษณะกระแส-แรงดัน ขณะได้รับไบอัสตรง

การศึกษาผลของแพลตินัมที่มีต่อพฤติกรรมของซิลิคอนไดโอดแบบรอยต่อพี-เอ็น(p-n junction diode) ในด้านลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าต่างๆ ได้แก่ ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันไฟฟ้า และความจุ-แรงดันไฟฟ้า รวมถึงการหาค่าตัวแปรทางฟิสิกส์ที่สำคัญ เพื่อใช้ในการอธิบายปรากฏการณ์ พฤติกรรม และกลไกที่เกิดขึ้นกับไดโอด ซึ่งผลการทดลองมีดังต่อไปนี้



รูปที่ 4.1 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันไฟฟ้าของไดโอด ที่ไม่ได้แพร่ด้วยอะตอมของแพลตินัม และผ่านการแพร่ด้วยอะตอมของแพลตินัมที่อุณหภูมิ 850 และ 900 °C ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.1 จะเห็นว่าความหนาแน่นกระแสขณะได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ( $I_R$ ), ขณะได้รับแรงดันไบอัสตรง( $I_F$ ) ที่แรงดันช่วง 0 ถึง 0.5 V และความต้านทานอนุกรม( $R_S$ ) เพิ่มขึ้นหลังจากแพร่ด้วยอะตอมของแพลตินัม และเมื่อเปรียบเทียบกับไดโอดที่ไม่ได้แพร่ด้วยอะตอมของแพลตินัมค่าความหนาแน่นกระแสเพิ่มขึ้นค่อนข้างมาก สมการกระแสของไดโอดรอยต่อพี-เอ็น[39] แสดงในสมการ 4.1

$$I = I_0(e^{qV_d/nkT} - 1) \quad (4.1)$$

เมื่อ  $I_0$  คือ กระแสอิ่มตัว

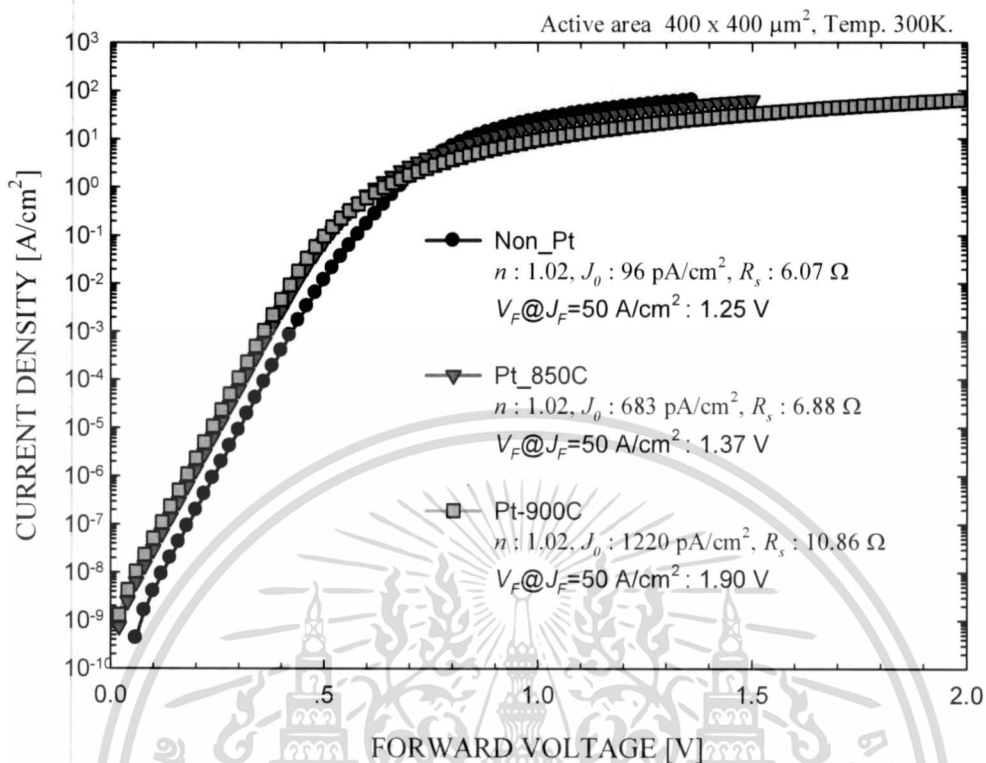
$n$  คือ ค่าตัวแปรอุดมคติ

$V_d$  คือ แรงดันไดโอดที่ตกคร่อมบริเวณปลอดพาหะ

สมมติถ้า  $I_0$  และ  $n$  คงที่ เมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\log(I)$  กับ  $V_d$  ค่าความชันจะมีเป็น  $V_d > nkT/q$  เนื่องจากกระแสของไดโอดรอยต่อพี-เอ็น เกิดจากส่วนประกอบกระแส 2 ส่วน [40] คือ กระแส R-G ในบริเวณปลอดพาหะ(scr) และในบริเวณนิวทริล(qnr) ได้ความสัมพันธ์ของกระแส-แรงดัน ในสมการ 4.2

$$I = I_{0,scr}(e^{q(V-Ir_s)/nkT} - 1) + I_{0,qnr}(e^{q(V-Ir_s)/nkT} - 1) \quad (4.2)$$

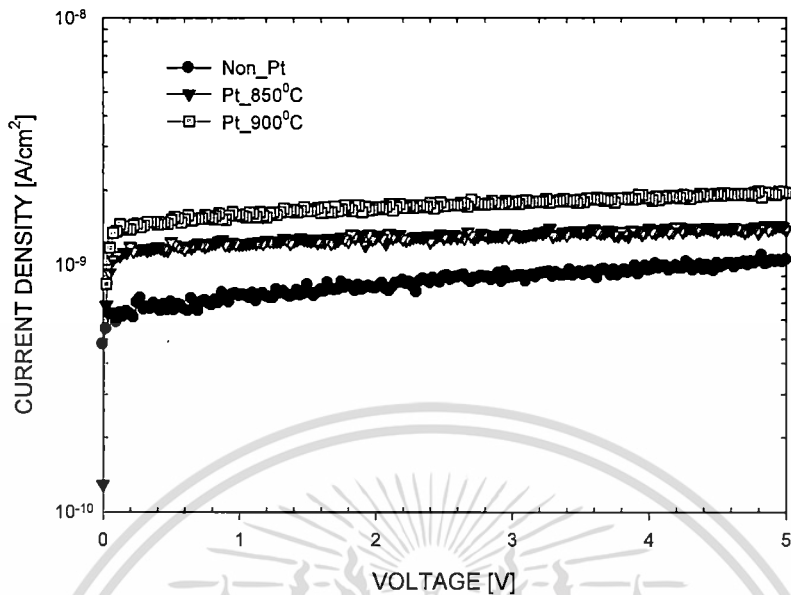
จากสมการที่ 4.2 สามารถค่า  $R_S$  สามารถหาได้จากบริเวณที่มีกระแสไบอัสตรงค่าสูง ขณะที่ค่าความหนาแน่นกระแสอิ่มตัว ( $J_0$ ) ได้จากการคำนวณจากค่ากระแสไบอัสตรง โดยแทนค่าตัวแปรอุดมคติ( $n$ ) ลงในสมการ ค่า  $n$ ,  $J_0$ ,  $R_S$  ของไดโอด ที่ไม่ได้แพร่ด้วยอะตอมของแพลตินัม และผ่านการแพร่ด้วยอะตอมของแพลตินัมที่อุณหภูมิ 850 และ 900 °C ตามลำดับ จากการหาค่า  $J_0$  ของไดโอด จะเห็นว่าหลังผ่านการเติมอะตอมแพลตินัมกระแสอิ่มตัวเพิ่มขึ้นจาก 96 pA/cm<sup>2</sup> เป็น 638 pA/cm<sup>2</sup> และ 1220 pA/cm<sup>2</sup> ซึ่งเพิ่มประมาณ 6.6 และ 12.7 เท่าตัว ส่วนตัวแปรอุดมคติของไดโอดพบว่ามีค่าประมาณ 1 และเมื่อพิจารณาที่บริเวณค่าความหนาแน่นกระแส 50 A/cm<sup>2</sup> ของไดโอดที่เติมอะตอมแพลตินัมอุณหภูมิ 850 และ 900 °C ค่าแรงดันไบอัสตรงมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 1.37V และ 1.90V ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับไดโอดที่ไม่ได้เติมอะตอมแพลตินัมมีค่า 1.25 V



รูปที่ 4.2 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันไฟฟ้าของไดโอดขณะได้รับไบอัสตรง

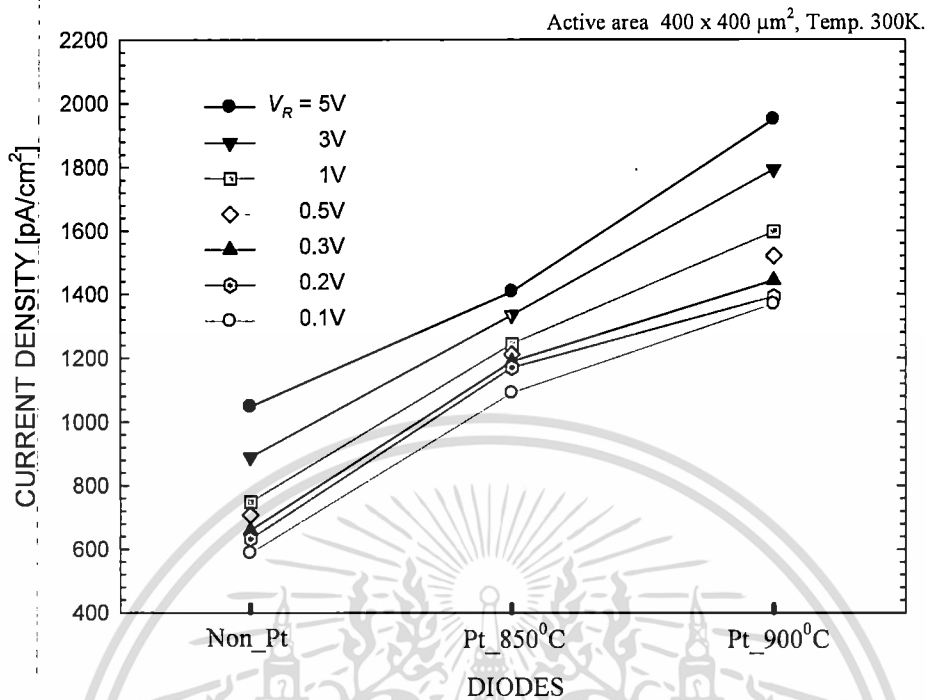
#### 4.2 คุณลักษณะกระแส-แรงดัน ขณะได้รับไบอัสย้อนกลับ

ลักษณะสมบัติกระแสขณะได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับของซิลิคอนไดโอดแบบ PiN ที่ไม่เติมอะตอมแพลตินัม และเติมอะตอมแพลตินัมที่อุณหภูมิ 850 และ 900 °C ตามลำดับ แสดงในรูปที่ 4.3 จากรูปจะสังเกตเห็นว่าลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้นหลังจากการแพร่ด้วยอะตอมแพลตินัม และเมื่อพิจารณาที่แรงดันไบอัสย้อนกลับ 5 V จะเห็นได้ว่าค่าความหนาแน่นกระแสรั่วไหลรอยต่อเพิ่มขึ้นน้อยกว่า 1 เท่าตัว ทั้งนี้เมื่อเปรียบเทียบกับไดโอดที่ไม่เติมอะตอมแพลตินัม ใดๆก็ตาม จะสังเกตเห็นว่าค่ากระแสรั่วของไดโอดที่ไม่เติมอะตอมแพลตินัมมีอัตราการเพิ่มขึ้นของกระแส กับค่าแรงดันไบอัสย้อนกลับมากกว่า นั่นหมายถึงอัตราการเกิดกระแสในบริเวณปลอดพาหะมีค่าสูงกว่า ซึ่งรายละเอียดการวิเคราะห์เพื่อหาสาเหตุจะกล่าวในบทถัดไป



รูปที่ 4.3. ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันไฟฟ้าขณะได้รับแรงดันย้อนกลับของซิลิคอนไดโอดแบบ PiN ที่ไม่เติมอะตอมแพลตินัม และเติมอะตอมแพลตินัมที่อุณหภูมิ 850 และ 900 °C ตามลำดับ

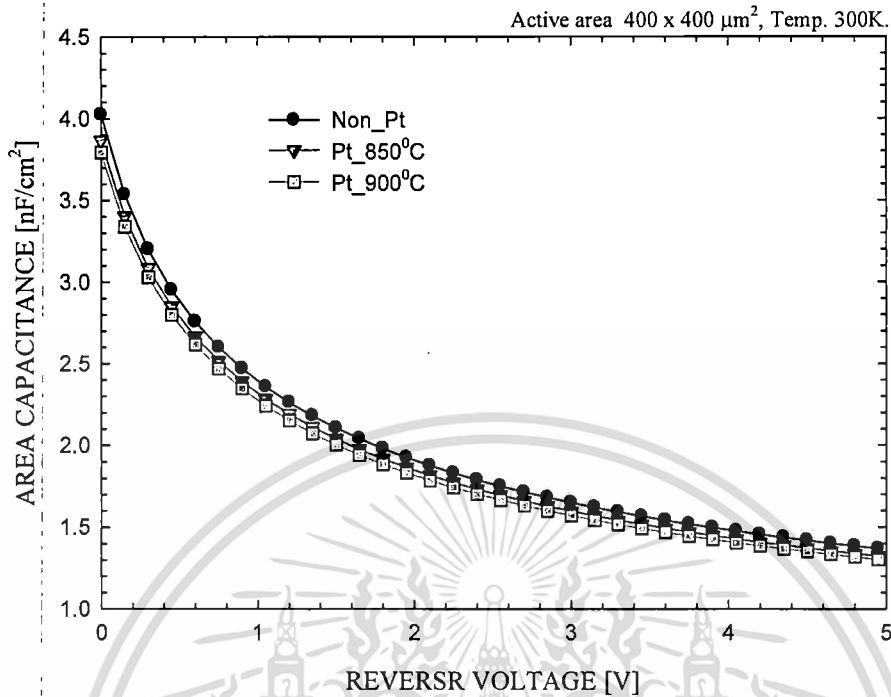
เพื่อศึกษาสมบัติกระแส-แรงดันไฟฟ้า ของไดโอดทั้ง 3 เซ็อนไซ ดังในรูปที่ 4.3 กล่าวคือ ที่ไม่เติมอะตอมแพลตินัม และเติมอะตอมแพลตินัมที่อุณหภูมิ 850 และ 900 °C ตามลำดับ ขณะได้รับแรงดันย้อนกลับที่แรงดันต่างกัน คือ 0.1, 0.2, 0.3, 0.5, 1, 3, 5V เมื่อพิจารณาเฉพาะแรงดัน 5V พบว่ากระแสรั่วไหลรยต่อมีค่าประมาณ 1000 pA/cm<sup>2</sup>, 1400 pA/cm<sup>2</sup> และ 2000 pA/cm<sup>2</sup> ซึ่งเพิ่มขึ้นประมาณ 0.4 และ 1 เท่าตัว ตามลำดับ แต่อย่างก็ตามพบว่าไดโอดที่เติมอะตอมแพลตินัมที่อุณหภูมิ 850 °C นั้นมีการกระจายตัวของกระแสรั่วไหลที่แรงดันทุกค่าน้อยกว่าเซ็อนไซอื่นๆ



รูปที่ 4.4 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันไฟฟ้าขณะได้รับแรงดันย้อนกลับที่แรงดันต่างกัน

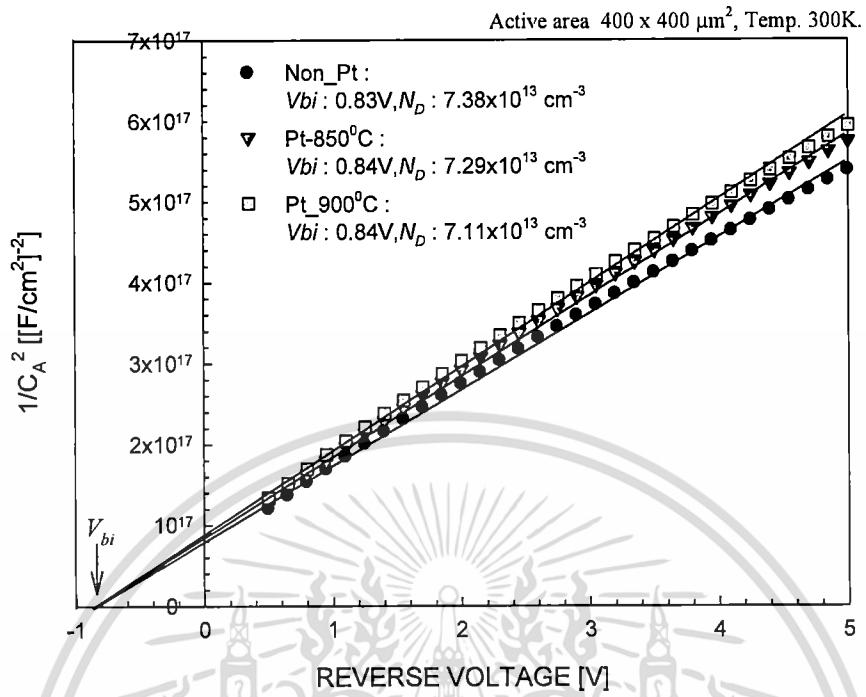
#### 4.3 คุณลักษณะความจุ-แรงดันไฟฟ้า

ค่าความจุไฟฟ้าของไดโอดแบบรอยต่อพี-เอ็น สามารถบ่งบอกถึงความลาดชันของสารเจือของรอยต่อ หากค่าแรงดันภายในรอยต่อ ( $V_b$ ) และความเข้มข้นของอะตอมสารเจือ ( $N_b$ ) ได้ [41] ในรูปที่ 4.4 แสดงลักษณะสมบัติความจุ-แรงดันไฟฟ้าพื้นที่ของซิลิคอนไดโอดแบบ PIN ที่ไม่เติมอะตอมแพลตตินัม และเติมอะตอมแพลตตินัมที่อุณหภูมิ 850 และ 900 °C ตามลำดับ หลังจากเติมด้วยอะตอมแพลตตินัมค่าความจุไฟฟ้าของซิลิคอนไดโอดแบบ PIN ที่เติมอะตอมแพลตตินัมที่อุณหภูมิ 850 และ 900 °C ลดลงเล็กน้อย เนื่องจากอะตอมของแพลตตินัมที่แพร่เข้าไปในสารกึ่งตัวนำซิลิคอนอาจจะทำหน้าที่จับพาหะอิสระจากอะตอมฟอสฟอรัสในผลึกฐานรอง ซึ่งจะวิเคราะห์สาเหตุในส่วนถัดไป

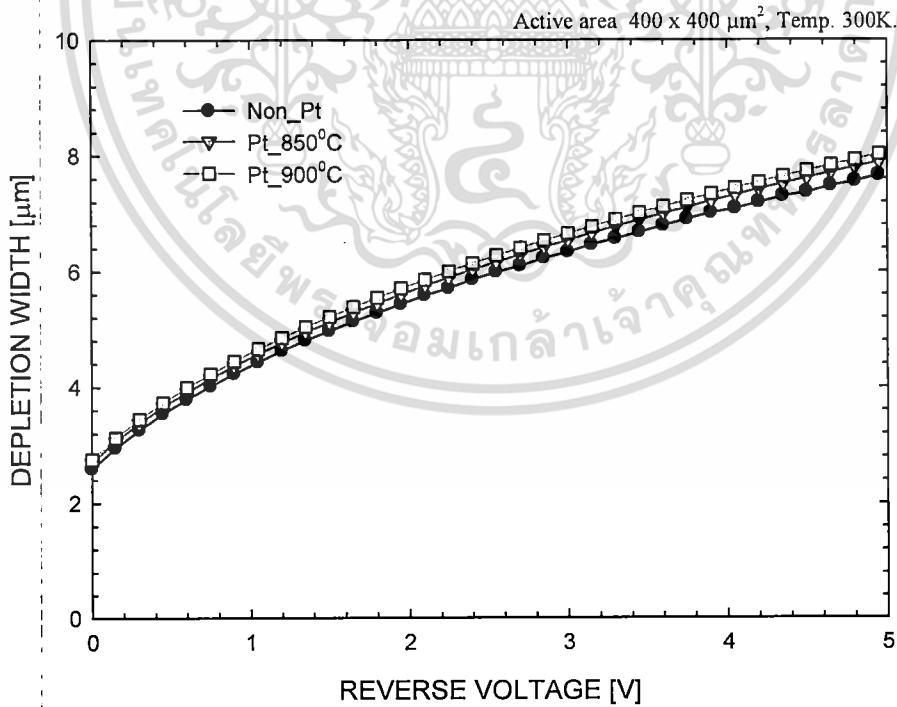


รูปที่ 4.4. ลักษณะสมบัติความจุ-แรงดันไฟฟ้าพื้นที่ของซิลิคอนไดโอดแบบ PiN ที่ไม่เติมอะตอมแพลตตินัม และเติมอะตอมแพลตตินัมที่อุณหภูมิ 850 และ 900 °C ตามลำดับ

อาศัยความสัมพันธ์ระหว่าง  $1/C_A^2$  กับ แรงดันไบอัสย้อนกลับ แสดงในรูปที่ 4.5 จากกราฟจุดตัดแกน X เมื่อค่าแกน Y เท่ากับ 0 สามารถหาค่าแรงดันภายในของซิลิคอนไดโอดแบบ PiN ที่ไม่เติมอะตอมแพลตตินัม และเติมอะตอมแพลตตินัมที่อุณหภูมิ 850 และ 900 °C เท่ากับ 0.83, 0.84 และ 0.84V ตามลำดับ จะเห็นว่าค่าแรงดันมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก ส่วนค่าความเข้มข้นของอะตอมสารเจือก็มีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย มีค่าเท่ากับ  $7.38 \times 10^{13}$ ,  $7.29 \times 10^{13}$ ,  $7.11 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$  ตามลำดับ นอกจากนี้แล้ว ค่าความจุไฟฟ้ารอยต่อยังสามารถใช้คำนวณหาความกว้างบริเวณปลอดพาหะของไดโอดอีกด้วย ในรูปที่ 4.6 สังเกตได้ว่าหลังผ่านการเติมอะตอมแพลตตินัมในไดโอด ค่าความกว้างบริเวณปลอดพาหะเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ซึ่งสอดคล้องกับการลดลงของความเข้มข้นของอะตอมสารเจือฐานรอง



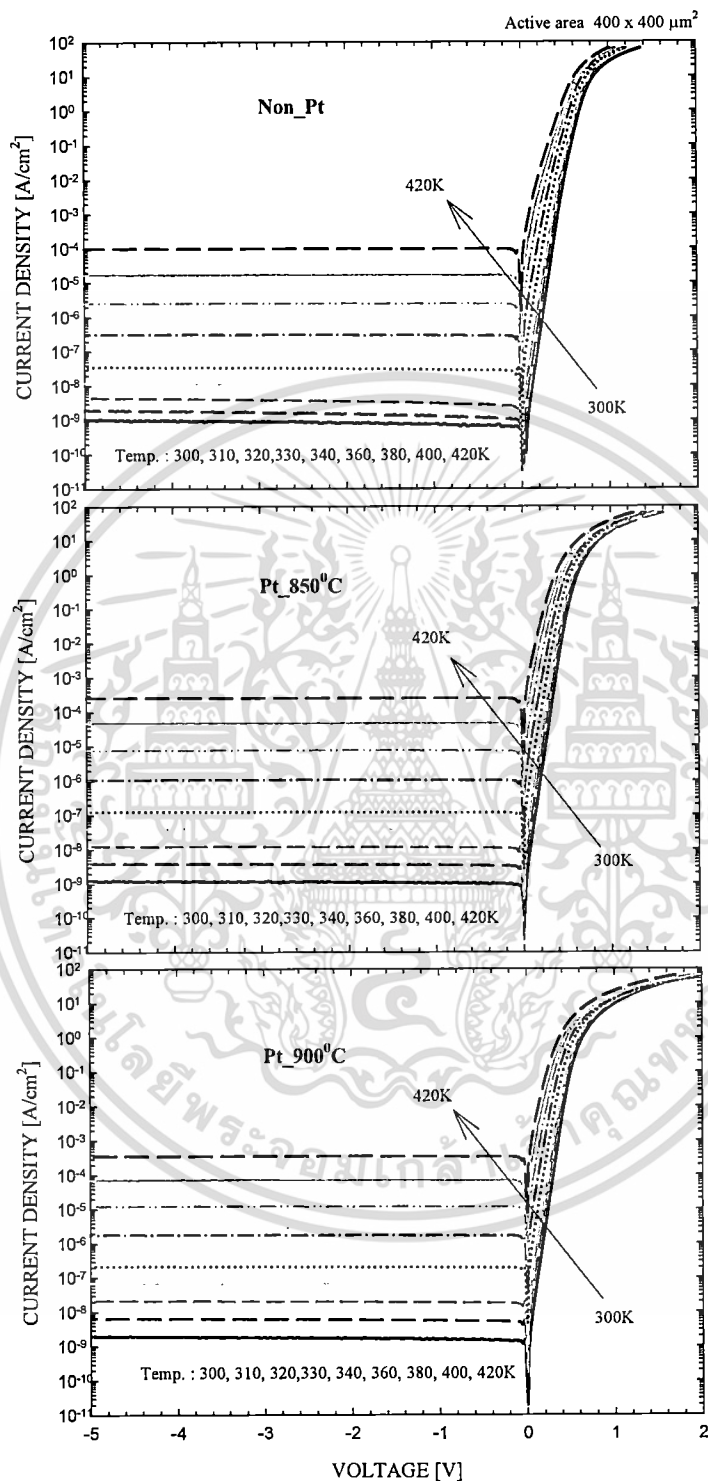
รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $1/C_A^2$  กับ แรงดันไบอัสย้อนกลับ ของซิลิคอนไดโอดแบบ PIN



รูปที่ 4.6 ความกว้างบริเวณปลอดพาหะ-แรงดันไฟฟ้า จากการคำนวณจากค่าความจุไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

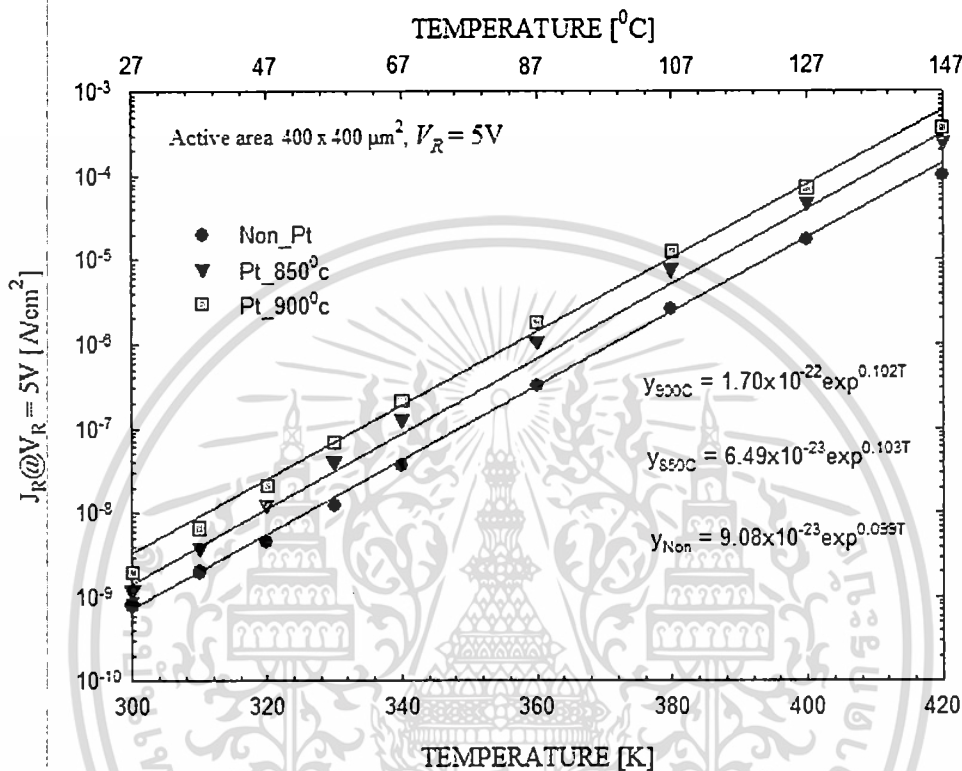
#### 4.4 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อลักษณะกระแส-แรงดันไฟฟ้า



รูปที่ 4.7. ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันไฟฟ้า ของซิลิคอนไดโอดแบบ PiN (a) ไม่เติมอะตอมแพลตตินัม และเติมอะตอมแพลตตินัมที่อุณหภูมิ (b) 850 และ (c) 900 °C ตามลำดับ ภายใต้ อุณหภูมิการวัดตั้งแต่ 300 ถึง 420K

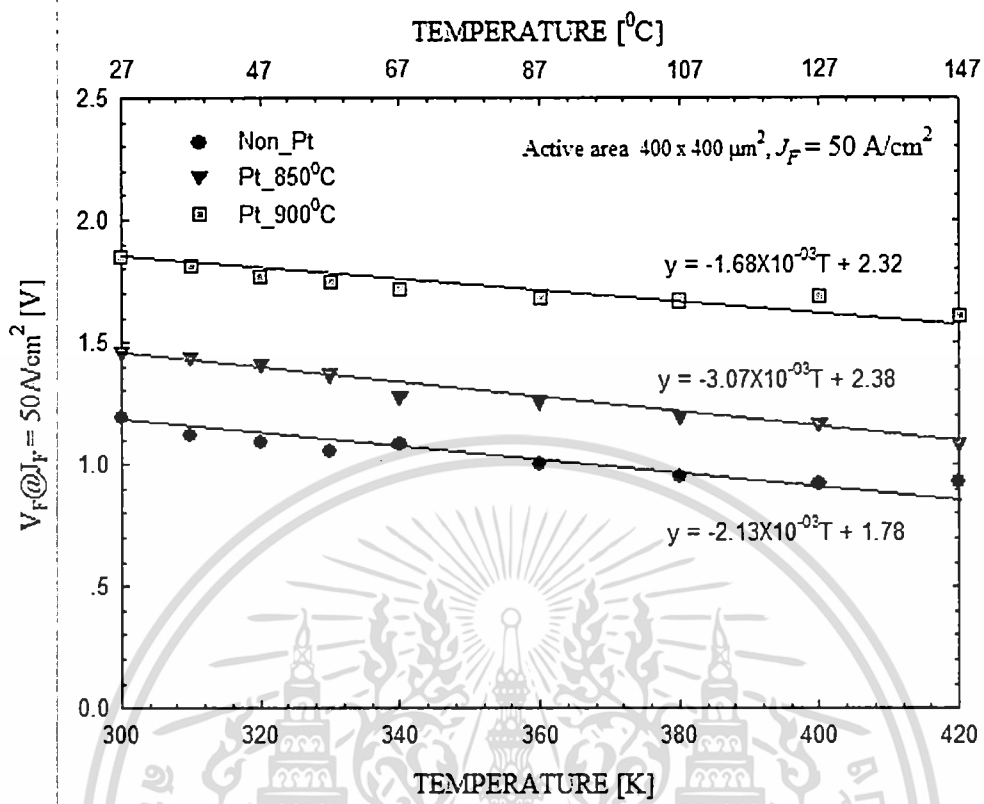
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การใช้งานไดโอดจำเป็นต้องคำนึงถึงอุณหภูมิที่ใช้งานด้วย เนื่องจากอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงจะส่งผลต่อพฤติกรรมการรั่วไหลของกระแสรอยต่อ และแรงดันตกคร่อมของไดโอด โดยกราฟรูปที่ 4.8 การเพิ่มขึ้นของกระแสรั่วของไดโอดทั้ง 3 เจอนไซการสร้างมีอัตราการเพิ่มที่ใกล้เคียงกัน



รูปที่ 4.8 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อค่าการรั่วไหลของกระแสรอยต่อที่แรงดัน 5V

ส่วนอิทธิพลของอุณหภูมิที่มีต่อค่าแรงดันตกคร่อม เมื่อค่าอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นแรงดันตกคร่อมจะมีค่าลดลง โดยเมื่อพิจารณาที่ความหนาแน่นกระแส  $50 A/cm^2$  พบว่าค่าสัมประสิทธิ์มีซิลิคอนไดโอดแบบ PiN ที่ไม่เติมอะตอมแพลตินัม และเติมอะตอมแพลตินัมที่อุณหภูมิ 850 และ 900  $^{\circ}C$  ค่าเท่ากับ  $-2.1 mV/K$ ,  $-3.0 mV/K$  และ  $-1.68 mV/K$  ตามลำดับ ซึ่งพบว่าไดโอดที่เติมอุณหภูมิ 900  $^{\circ}C$  มีค่าการเปลี่ยนแปลงน้อยที่สุด



รูปที่ 4.9 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อค่าแรงดันตกคร่อมที่ความหนาแน่นกระแส  $50 \text{ A/cm}^2$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### การวิเคราะห์ และอภิปรายผลการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการนำเสนอลักษณะสมบัติทางไฟฟ้า และการวิเคราะห์ความถดถอยของซิลิคอนไดโอดแบบ PIN หลังผ่านการเติมด้วยอะตอมแพลตินัม โดยทำการเปรียบเทียบกับไดโอดที่ไม่เติมอะตอมแพลตินัม สำหรับการวิเคราะห์ความถดถอยนั้น ได้ทำการแยกส่วนประกอบกระแสที่ไหลผ่านพื้นที่หน้าตัด และกระแสที่ไหลผ่านบริเวณขอบรอยต่อออกจากกัน ทั้งนี้เพื่อความถูกต้องในการวิเคราะห์ผลการทดลอง และศึกษาผลของอะตอมแพลตินัม ที่มีต่อพฤติกรรมซิลิคอนไดโอดแบบ PIN

#### 5.1 การแยกประเภทกระแส

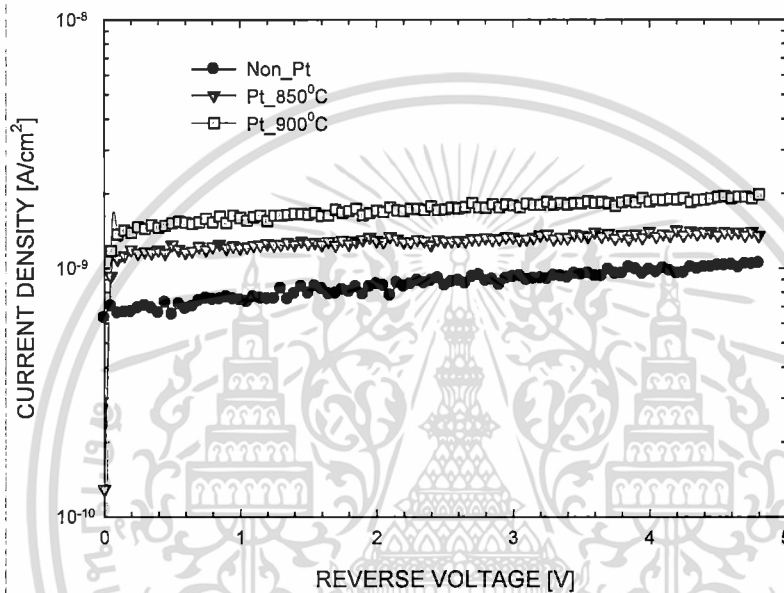
การวัดลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันไฟฟ้า และความจุ-แรงดันไฟฟ้า ของไดโอดที่มีลักษณะรูปทรงเลขาคณิต ทั้งขนาดพื้นที่หน้าตัด ( $A$ ) และความยาวรอบรูป ( $P$ ) ต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 5.1. ทั้งนี้เพื่อการแยกส่วนประกอบ และวิเคราะห์กระแสที่ไหลผ่านไดโอด จากทฤษฎี ส่วนประกอบกระแสของรอยต่อพี-เอ็น ซึ่งประกอบด้วย กระแสที่ไหลผ่านพื้นที่หน้าตัด ( $I_A$ ) และกระแสที่ไหลบริเวณขอบ ( $I_p$ ) ของไดโอด จากส่วนประกอบกระแสทั้งหมด สามารถเขียนได้ ดังสมการ

ตารางที่ 5.1. เปรียบเทียบลักษณะไดโอดที่มีรูปทรงเลขาคณิตต่างกัน ( $A$  คือ พื้นที่หน้าตัด,  $P$  คือ ความยาวรอบรูป และ  $N_C$  เป็นจำนวนมุม)

Diode	Structure [WxL]xN	Area ( $\text{cm}^2$ )	Perimeter (cm)	Corner	P/A ( $\text{cm}^{-1}$ )
SQ	[400 $\mu\text{m}$ x400 $\mu\text{m}$ ]X1	0.0016	0.16	4	100
FG1	[30 $\mu\text{m}$ x334 $\mu\text{m}$ ]X10	0.0010	0.728	40	728
FG2	[30 $\mu\text{m}$ x167 $\mu\text{m}$ ]X20	0.0010	0.788	80	788
FG3	[30 $\mu\text{m}$ x84 $\mu\text{m}$ ]X40	0.0010	0.912	160	912
FG4	[30 $\mu\text{m}$ x42 $\mu\text{m}$ ]X80	0.0010	1.152	320	1152

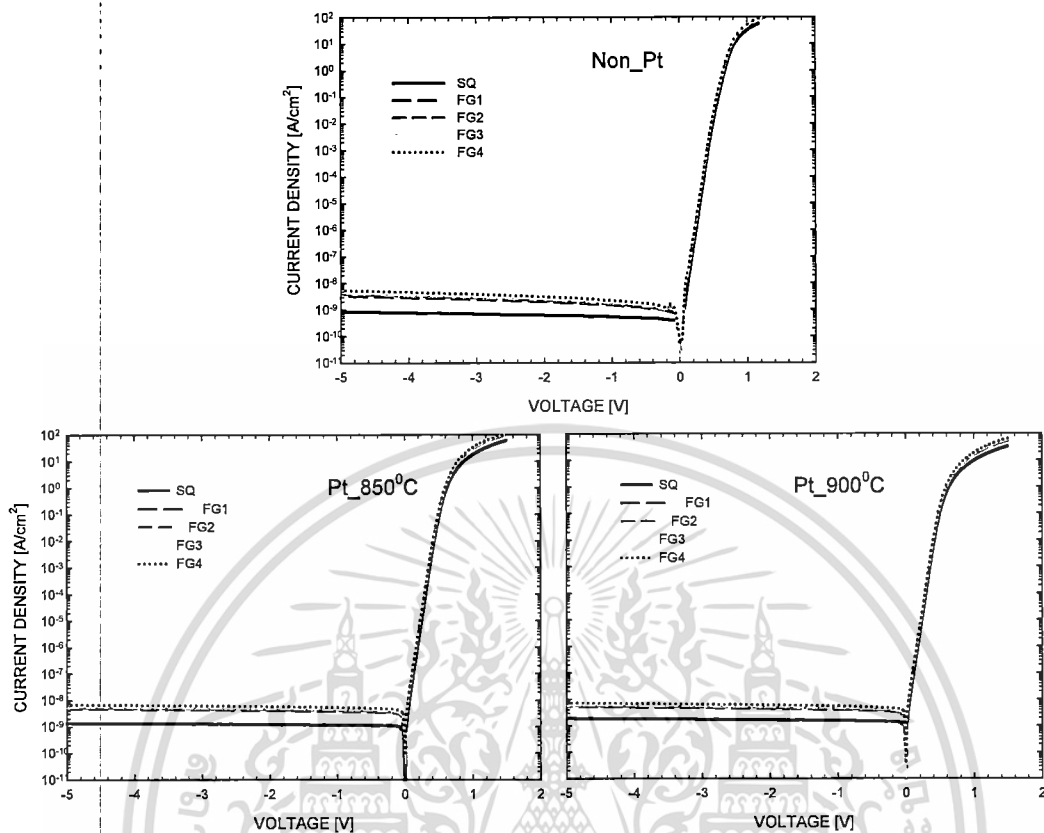
$$I = I_A + I_P = AJ_A + PJ_P \quad (5.1)$$

จากความสัมพันธ์นี้ ค่าความชันเชิงเส้นระหว่าง  $I/P$  และ  $A/P$  สามารถหาส่วนประกอบของความหนาแน่นกระแสพื้นที่หน้าตัด ( $J_A$ ) ในขณะที่ค่าความชันเชิงเส้นระหว่าง  $I/A$  และ  $P/A$  สามารถหาส่วนประกอบของความหนาแน่นกระแสไหลบริเวณขอบรอยต่อ ( $J_P$ ) ของไดโอดได้



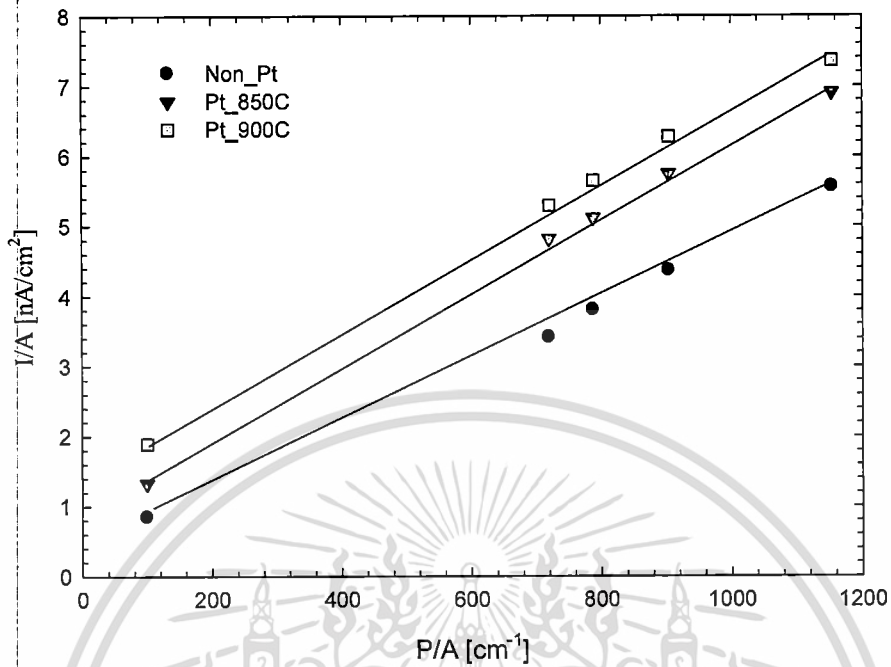
รูปที่ 5.1. ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันไฟฟ้าขณะได้รับแรงดันย้อนกลับของซิลิคอนไดโอดแบบ PiN ที่ไม่เติมอะตอมแพลตินัม และเติมอะตอมแพลตินัมที่อุณหภูมิ 850 และ 900 °C ตามลำดับ

ในรูปที่ 5.1 แสดงลักษณะสมบัติกระแสขณะได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับของซิลิคอนไดโอดแบบ PiN ที่ไม่เติมอะตอมแพลตินัม และเติมอะตอมแพลตินัมที่อุณหภูมิ 850 และ 900 °C ตามลำดับ จากรูปจะสังเกตเห็นว่าลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้นหลังจากการแพร่ด้วยอะตอมแพลตินัม และเมื่อพิจารณาที่แรงดันไบอัสย้อนกลับประมาณ 5 V จะเห็นได้ว่าค่าความหนาแน่นกระแสรั่วไหลรอยต่อเพิ่มขึ้นน้อยกว่า 1 เท่าตัว ทั้งนี้เมื่อเปรียบเทียบกับไดโอดที่ไม่เติมอะตอมแพลตินัม เพื่อศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิที่มีต่อพฤติกรรมกระแสรั่วไหลของกระแส รอยต่อของไดโอด

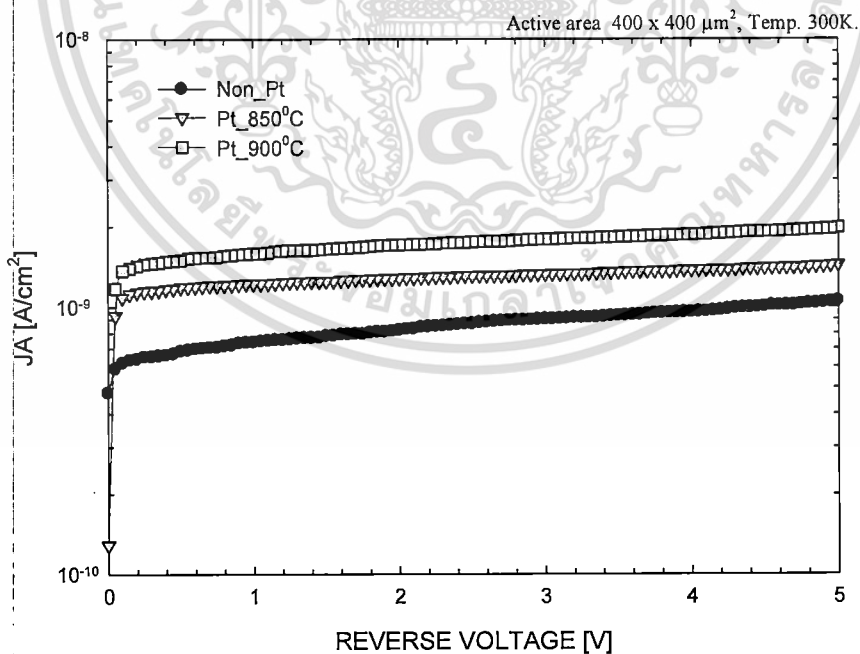


รูปที่ 5.2. ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันไฟฟ้า ของซิลิคอนไดโอดแบบ PIN ที่ไม่เติมอะตอมแพลตินัม และเติมอะตอมแพลตินัมที่อุณหภูมิ 850 และ 900 °C ตามลำดับ

ในรูปที่ 5.3 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแส ( $I/A$ ) ย้อนกลับ กับ อัตราส่วนระหว่างความยาวรอบรูปต่อพื้นที่หน้าตัด ( $P/A$ ) ที่แรงดัน  $V_R=5V$  โดยจะเห็นว่า อัตราส่วน  $P/A$  มีผลต่อค่าความหนาแน่นกระแสย้อนกลับ นั่นหมายความว่า ความหนาแน่นกระแสย้อนกลับจะเพิ่มตามความยาวรอบรูปของรอยต่อเป็นอย่างมาก ถึงแม้ว่าไดโอดจะมีพื้นที่หน้าตัดของรอยต่อเท่ากันก็ตาม และจากรูปสามารถหาค่าความหนาแน่นกระแสบริเวณขอบ ( $J_p$ ) ได้จากค่าความชันเชิงเส้นกราฟ และจุดตัดแกน Y สามารถหาค่าความหนาแน่นกระแสพื้นที่หน้าตัด ( $J_A$ ) ได้จากค่าความชันเชิงเส้นกราฟ จากรูปที่ 5.3 สามารถหาค่า  $J_A$



รูปที่ 5.3. กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแส ( $I/A$ ) ย้อน กลับ กับอัตราส่วนระหว่างความยาวรอบรูปต่อพื้นที่หน้าตัด ( $P/A$ ) ที่แรงดัน  $V_R=5V$



รูปที่ 5.4.  $J_A-V_R$  ของซิลิคอนไดโอดแบบ PiN ที่ไม่เติมอะตอมแพลตินัม และเติมอะตอมแพลตินัมที่อุณหภูมิ 850 และ 900 °C ตามลำดับ

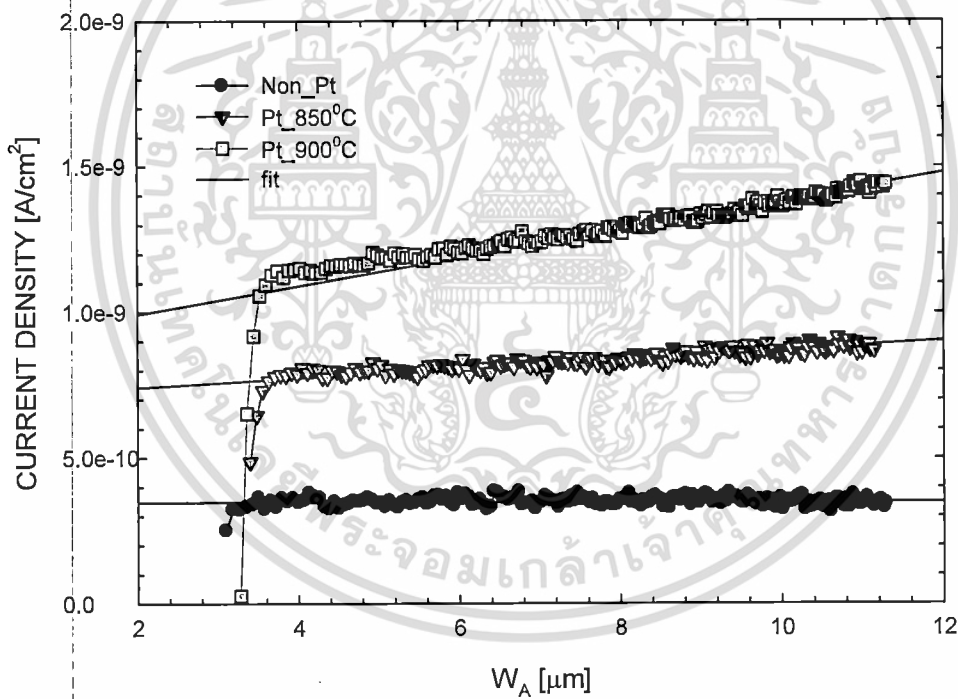
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากความหนาแน่นกระแสรั่วไหลรอยต่อของไดโอดนั้น เกิดจากส่วนประกอบของกระแสการแพร่ ( $J_{dA}$ ) และกระแสการเกิดใหม่ ( $J_{gen}$ ) รวมกันดังนั้นจึงสามารถแยกส่วนประกอบทั้งสองออกจากกันได้ โดยอาศัยสมการ

$$J_A = J_{dA} + J_{gen} \quad (5.1)$$

และ 
$$J_{gen} = \frac{qn_i W_A}{\tau_g} \quad (5.2)$$

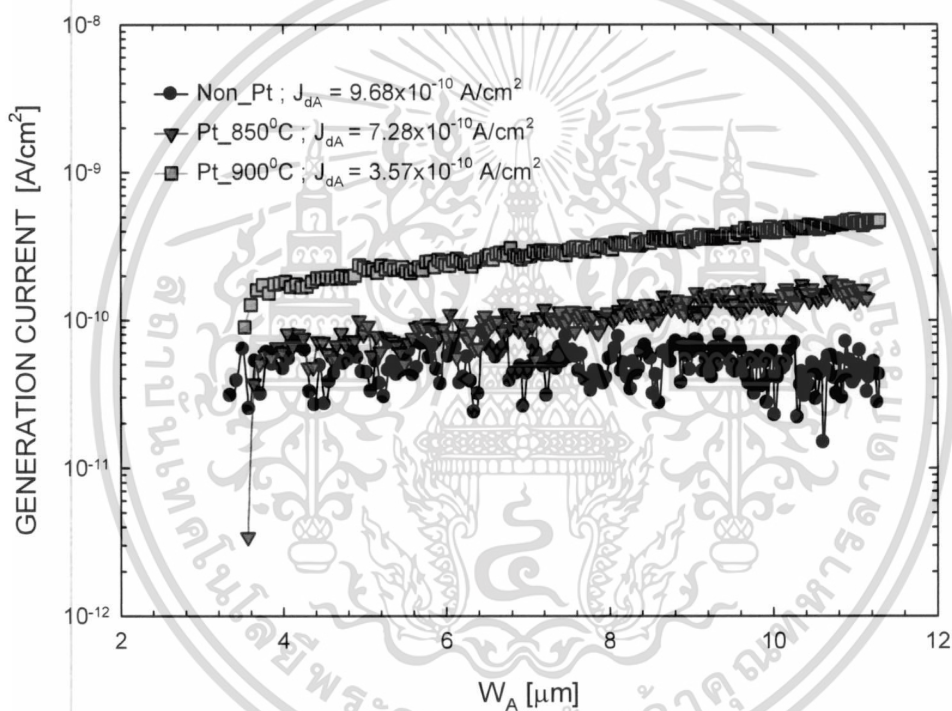
จากความสัมพันธ์ของสมการ 5.1 และ 5.2 สามารถแยกเกิดจากส่วนประกอบของกระแสการแพร่และกระแสการเกิดใหม่ ด้วยการ  $J_A - W_A$  กราฟแสดงในรูปที่ 5.5 จากกราฟสามารถค่ากระแสการแพร่จากจุดตัดแกน Y ส่วนค่าความชันของกราฟคือ  $\tau_g^{-1}$  รายละเอียดจะกล่าวในหัวข้อถัดไป



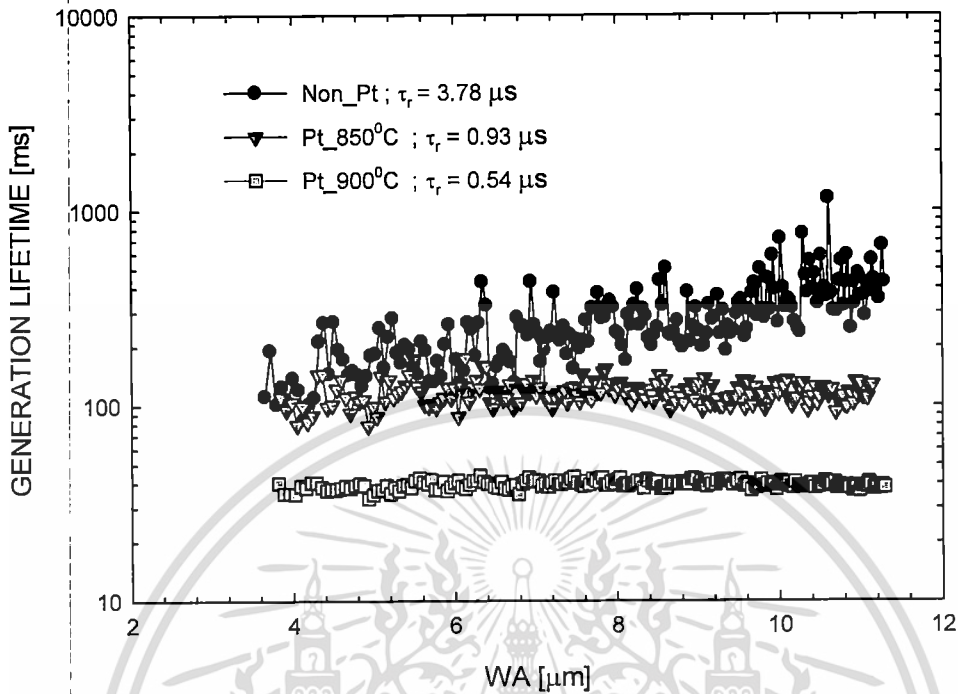
รูปที่ 5.5 ความสัมพันธ์ของ  $J_A - W_A$  ของของซิลิคอนไดโอดแบบ PiN

## 5.2 อายุพาหะการรวมตัว และการเกิด

หลังจากทำการแยกส่วนประกอบของ  $J_{dA}$  และ  $J_{gen}$  แล้ว ค่ากระแสการแพร่มีความสัมพันธ์กันอายุพาหะการรวมตัว ( $\tau$ ) ในรูปที่ 5.6 ความสัมพันธ์ของ  $J_{gen} - W_A$  ของของซิลิคอนไดโอด หลังเติมอะตอมแพลตินั่มทั้ง กระแสการแพร่ และกระแสการเกิด มีค่าเพิ่มขึ้น จากสมการที่ 5.2 ก็จะสามารถหาค่าอายุพาหะการเกิดได้ ดังแสดงในรูปที่ 5.7 ความสัมพันธ์ของอายุการเกิดในเนื้อสารได้รอยต่อพี-เอ็น เมื่อพิจารณาที่ระดับความลึก 4  $\mu\text{m}$  พบว่าอายุพาหะการเกิดลดลงจากประมาณ 100 ms มาอยู่ที่ 20 ms ส่วนอายุการรวมตัวก็ลดลงเช่นกัน โดยมีค่าเท่ากับ 3.78, 0.93 และ 0.45  $\mu\text{s}$  ตามลำดับ



รูปที่ 5.6 ความสัมพันธ์ของ  $J_{gen} - W_A$  ของของซิลิคอนไดโอดแบบ PiN



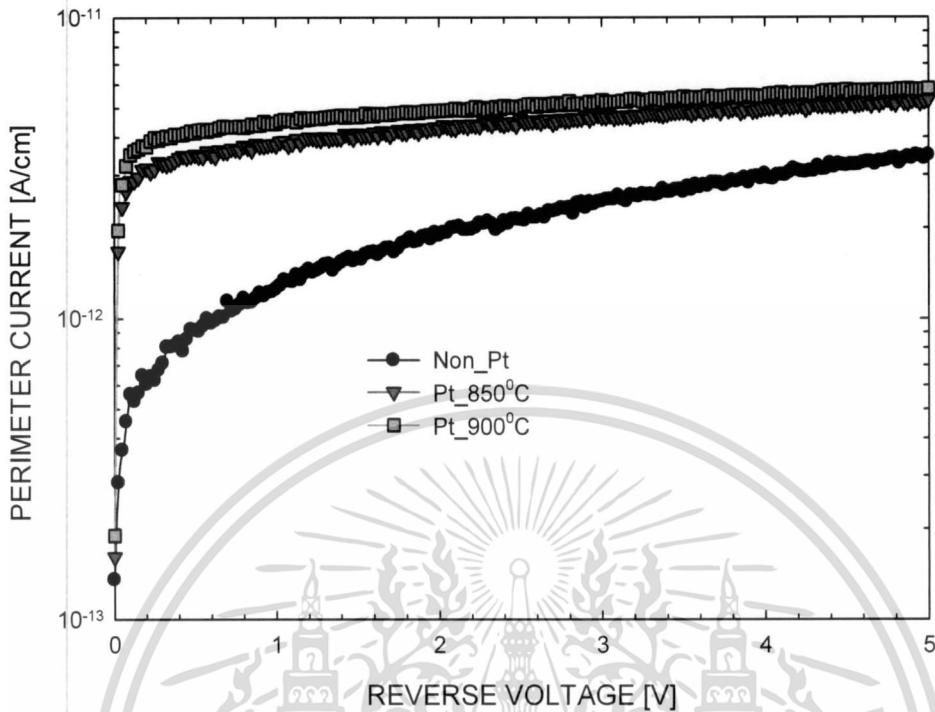
รูปที่ 5.7 ความสัมพันธ์ของ  $\tau_g - W_A$  ของของซิลิคอนไดโอดแบบ PIN

### 5.3 ความเร็วการเกิดบริเวณผิว

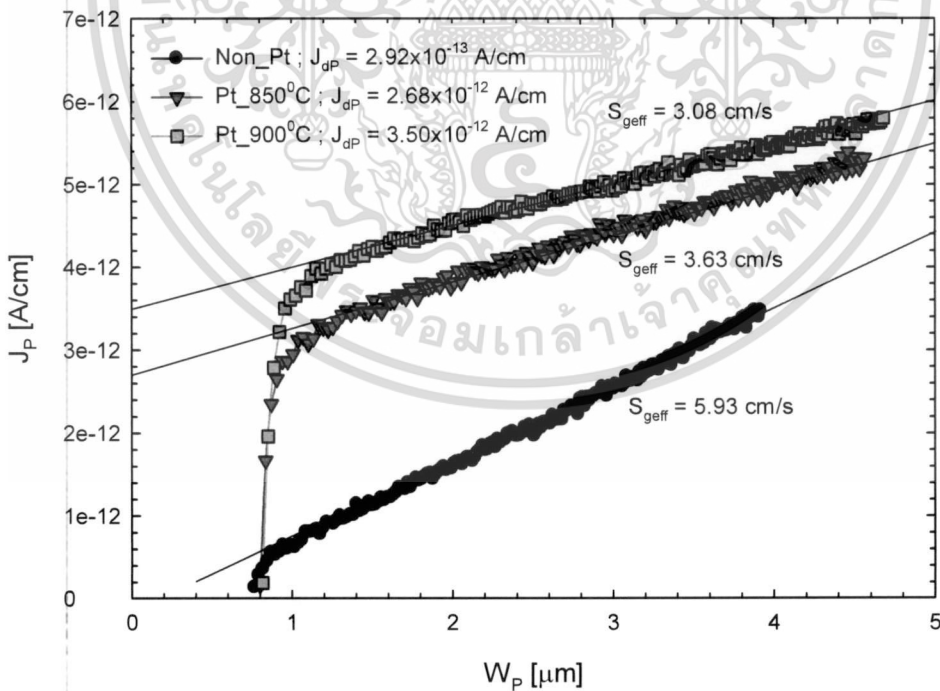
จากที่กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 5.1 ว่าสามารถหาส่วนประกอบของความหนาแน่นกระแสไหลบริเวณขอบรอยต่อ หรือ  $J_p$  ของไดโอดได้ ซึ่งความสัมพันธ์ของกระแสบริเวณขอบและแรงดัน แสดงดังในรูปที่ 5.8 ซึ่งกลไกการเกิดกระแสบริเวณดังกล่าวเป็นผลรวมเกิดจากส่วนประกอบของกระแสการแพร่ ( $J_{dp}$ ) และกระแสการเกิดใหม่ ( $J_{gp}$ ) ดังสมการ

$$J_p = J_{dp} + qn_i S_{eff} W_p \quad (5.3)$$

ใช้ความสัมพันธ์ของกราฟ  $J_p - W_p$  ก็สามารถแยกส่วนประกอบของกระแสการแพร่ ( $J_{dp}$ ) และกระแสการเกิดใหม่ ( $J_{gp}$ ) บริเวณขอบของของซิลิคอนไดโอดได้ จะเห็นว่าหลังเติมอะตอมแพลตินัมแล้ว กระแสการแพร่ บริเวณขอบของไดโอดมีค่าเพิ่มขึ้น  $2.92 \times 10^{-13} \text{ A/cm}^2$  เป็น  $2.68 \times 10^{-12} \text{ A/cm}^2$  และ  $3.50 \times 10^{-12} \text{ A/cm}^2$  ตามลำดับ หรือเพิ่มประมาณ 10 เท่าตัว และเมื่อทราบค่ากระแสการเกิดใหม่ บริเวณขอบก็สามารถหาความเร็วการเกิดบริเวณผิวได้ จากข้อมูลทั้งหมดพบว่ากระแสที่เกิดบริเวณขอบของรอยต่อเกิดจากกลไกกระแสการแพร่เป็นหลัก



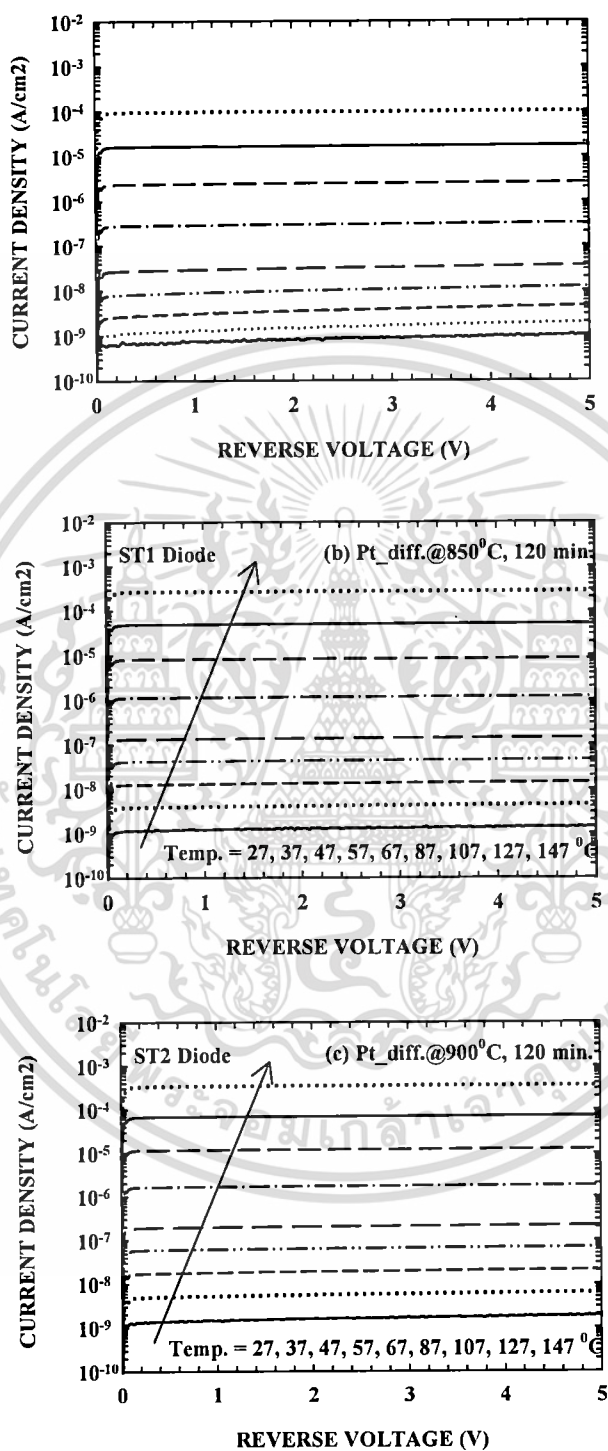
รูปที่ 5.8 ความสัมพันธ์ของกระแสบริเวณขอบ-แรงดัน ของซิลิคอนไดโอด



รูปที่ 5.9 ความสัมพันธ์ของ  $J_p - W_p$  ของซิลิคอนไดโอด หลังเติมอะตอมแพลตินัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 5.4 ระดับพลังงานกระตุ้น



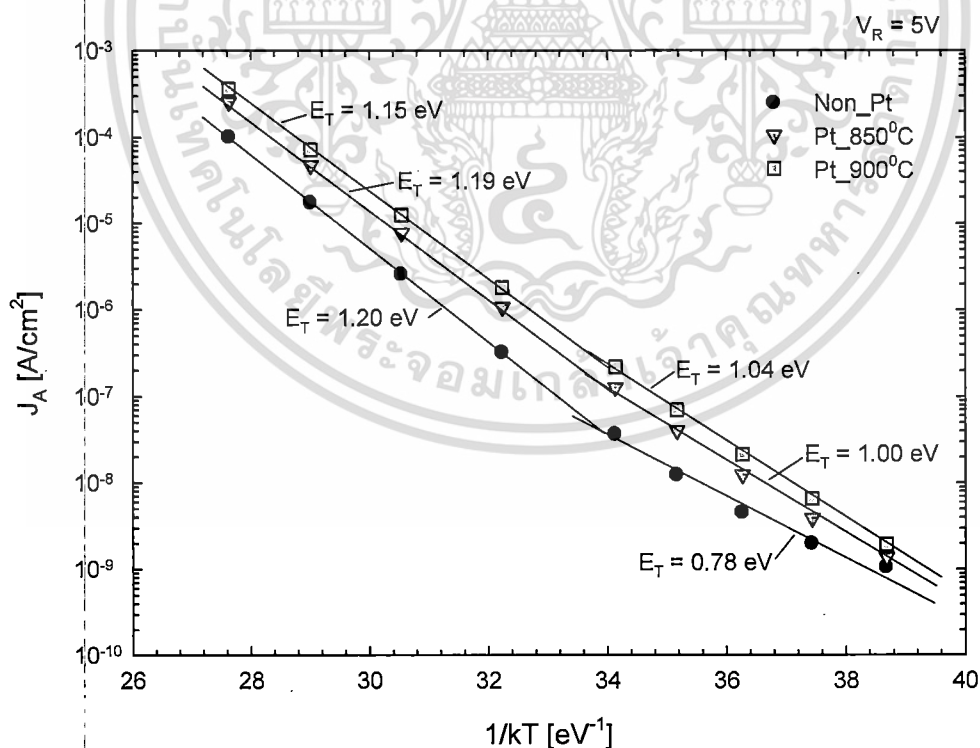
รูปที่ 5.10. ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันไฟฟ้าขณะได้รับแรงดันย้อนกลับของซิลิคอนไดโอดแบบ

PiN (a) ไม่เติมอะตอมแพลตินัม และเติมอะตอมแพลตินัมที่อุณหภูมิ (b) 850 และ (c) 900

°C ตามลำดับ ภายใต้อุณหภูมิการวัดตั้งแต่ 27 ถึง 147 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

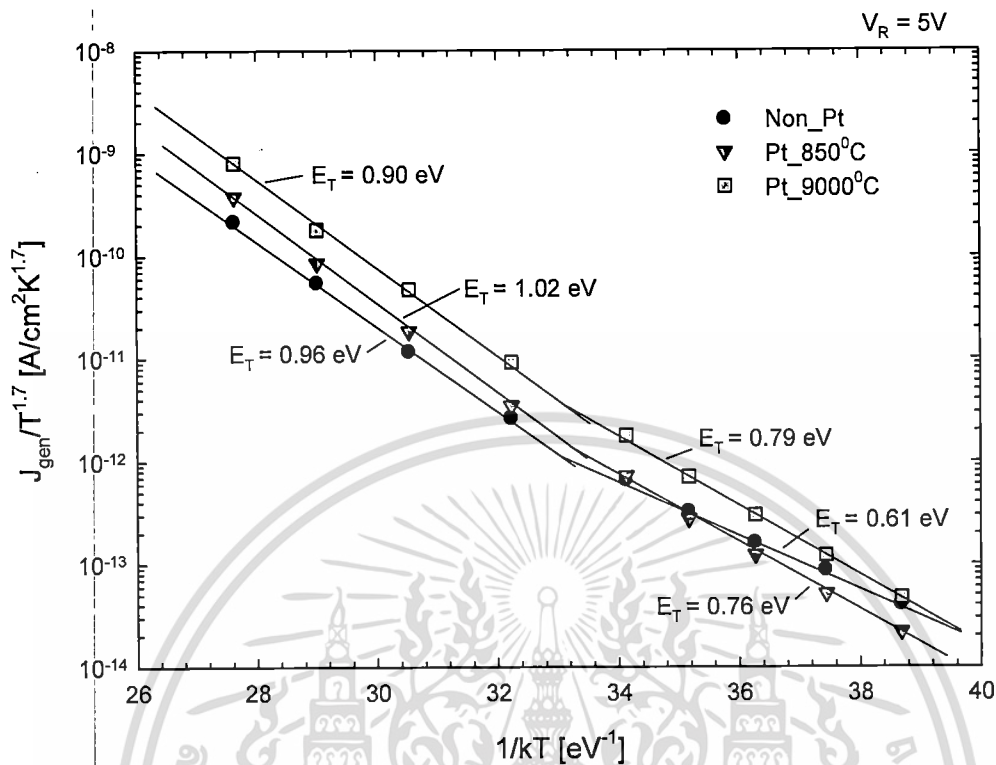
เนื่องจากความหนาแน่นกระแสรั่วไหลรอยต่อของไดโอดนั้น เกิดจากส่วนประกอบของกระแสการแพร่ (diffusion current) และกระแสการเกิดใหม่ (generation current) รวมกัน[4] ดังนั้นจึงสามารถแยกส่วนประกอบทั้งสองออกจากกันได้ โดยทำการศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีต่อค่าความหนาแน่นกระแสรั่วไหลรอยต่อ ถ้าค่าความหนาแน่นกระแสรั่วไหลรอยต่อมีผลเด่นจากกระแสการแพร่ค่าความชันของ Arrhenius plot หรือก็คือ ระดับพลังงานกระตุ้น (activation energy) มีค่าเข้าใกล้ค่าความกว้างช่องว่างพลังงานของซิลิคอน นั่นคือ 1.12 eV (300 K) ในขณะที่ ค่าความหนาแน่นกระแสรั่วไหลรอยต่อมีผลเด่นจากกระแสการเกิดใหม่ ค่าความชันของ Arrhenius plot มีค่าเข้าใกล้แถบกลางของความกว้างช่องว่างพลังงาน ( $E_g$ ) ของซิลิคอน นั่นคือ 0.56 eV (300 K) ในรูปที่ 5.11 แสดง Arrhenius plot ความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln J_A$  และ  $1/kT$  ของไดโอดแบบ PiN ที่ไม่เติมอะตอมแพลตินัม และเติมอะตอมแพลตินัมที่อุณหภูมิ 850 และ 900 °C ขณะที่ได้รับแรงดันย้อนกลับ 5V จากความสัมพันธ์ดังกล่าว จะเห็นได้ว่า ในช่วงอุณหภูมิต่ำ ซิลิคอนไดโอดแบบ PiN ที่ไม่เติมอะตอมแพลตินัมระดับพลังงานกระตุ้นมีค่า 0.78 eV ซึ่งให้เห็นว่าค่าความหนาแน่นกระแสพื้นที่ส่วนใหญ่เกิดจากผลของกระแสการเกิดใหม่ แต่ในช่วงอุณหภูมิสูง พบว่าระดับพลังงานกระตุ้นมีค่าเข้าใกล้  $E_g$  บ่งชี้ว่ากระแสการแพร่มีลักษณะเด่น สำหรับในไดโอดที่เติมด้วยอะตอมแพลตินัม กระแสการแพร่มีลักษณะเด่นตลอดช่วงอุณหภูมิ



รูปที่ 5.11. Arrhenius plot ความสัมพันธ์ระหว่าง  $J_A$  ของซิลิคอนไดโอดแบบ PiN ที่ไม่เติมอะตอม

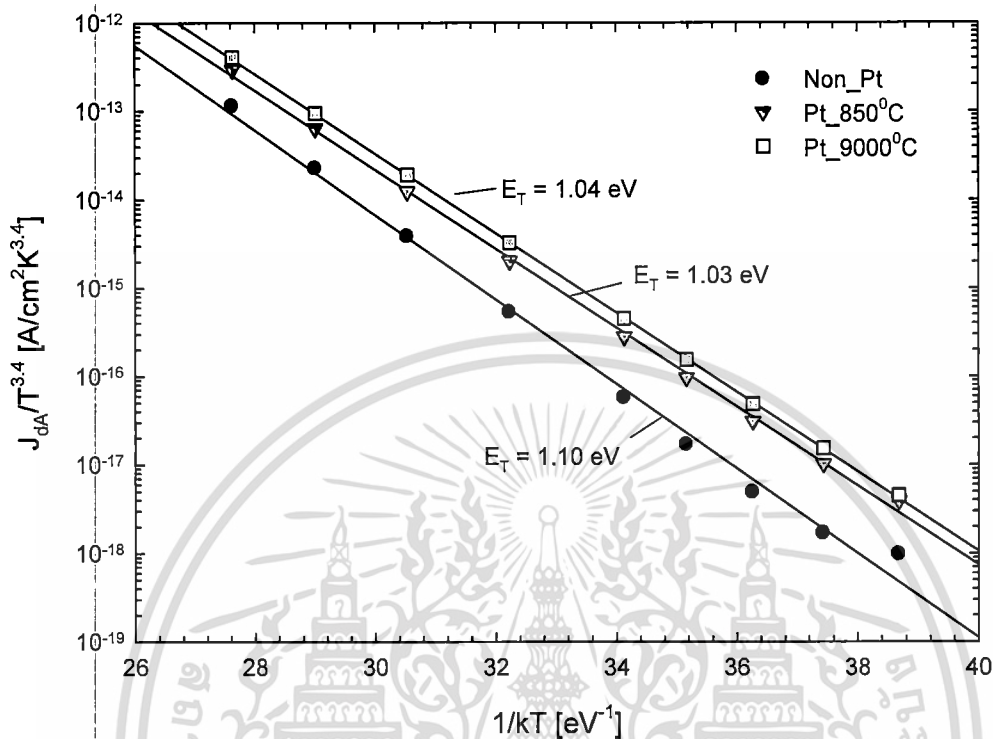
แพลตินัม และเติมอะตอมแพลตินัม ในช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ 27 ถึง 147 °C ที่แรงดัน  $V_R=5V$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.12. Arrhenius plot ความสัมพันธ์ระหว่าง  $J_{gen}/T^{1.7}$  ของซิลิคอนไดโอดแบบ PiN ที่ไม่เติมอะตอมแพลตินัม และเติมอะตอมแพลตินัม ในช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ 27 ถึง 147 °C ที่แรงดัน  $V_R=5V$

ในรูปที่ 5.12 แสดง Arrhenius plot ความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln J_{gen}/T^{1.7}$  และ  $1/kT$  ของไดโอดแบบ PiN ที่ไม่เติมอะตอมแพลตินัม และเติมอะตอมแพลตินัมที่อุณหภูมิ 850 และ 900 °C ขณะที่ได้รับแรงดันย้อนกลับ 5V จะเห็นได้ว่า ในช่วงอุณหภูมิต่ำ ซิลิคอนไดโอดแบบ PiN ทั้งที่ไม่เติมอะตอมแพลตินัม และเติมอะตอมแพลตินัมที่อุณหภูมิ 850 และ 900 °C ตามลำดับ ระดับพลังงานกระตุ้นมีค่าอยู่ในช่วง 0.61, 0.76 และ 0.79 eV ตามลำดับ ซึ่งให้เห็นว่าค่าความหนาแน่นกระแสส่วนใหญ่เกิดจากผลของกระแสการเกิดใหม่ ส่วนในช่วงอุณหภูมิสูง พบว่าระดับพลังงานกระตุ้นมีค่าเข้าใกล้  $E_g$  มากขึ้น



รูปที่ 5.13. Arrhenius plot ความสัมพันธ์ระหว่าง  $J_{dA}/T^{3.4}$  ของซิลิคอนไดโอดแบบ PiN ที่ไม่เติมอะตอมแพลตินัม และเติมอะตอมแพลตินัม

ในรูปที่ 5.13 แสดง Arrhenius plot ความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln J_{dA}/T^{3.4}$  และ  $1/kT$  ของไดโอดแบบ PiN ที่ไม่เติมอะตอมแพลตินัม และเติมอะตอมแพลตินัมที่อุณหภูมิ 850 และ 900 °C ขณะที่ได้รับแรงดันย้อนกลับ 5V จะเห็นได้ว่า ตลอดช่วงอุณหภูมิค่าซิลิคอนไดโอดทั้ง 3 เจือปน มีระดับพลังงานกระตุ้นมีค่าเข้าใกล้  $E_g$  จากการวิเคราะห์การเกิดกระแสรั่วไหลรอยต่อของไดโอด จะสังเกตได้ว่า กลไกการเกิดกระแสส่วนใหญ่เกิดจากการแพร่

## บทที่ 6

### สรุป

อุปกรณ์สวิตชิงความเร็วสูงยุคใหม่ต้องการไดโอดความเร็วสูงเพื่อทำหน้าที่เป็นฟรีเวลลิ่งไดโอด (FWD) จึงจำเป็นต้องเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของ FWD เนื่องจากความเร็วในการทำงานของวงจรสวิตชิงความเร็วสูง และการสูญเสียพลังงานของวงจรถูกกำหนดด้วยพฤติกรรมการคืนตัวกลับของ FWD อีกทั้งในปัจจุบันความต้องการความเร็วในการทำงานของวงจรสวิตชิง เช่นใน inverter และ converter มีสูงขึ้น ดังนั้นการเพิ่มประสิทธิภาพไดโอดกำลังโครงสร้าง PiN เพื่อทำหน้าที่เป็น FWD จึงเป็นสิ่งที่สำคัญสำหรับงานอิเล็กทรอนิกส์กำลังในปัจจุบัน

ในงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการปรับค่าของอายุพหุพหุส่วนน้อยในไดโอดกำลังแบบซิลิคอน โดยการสร้างตำหนิ เพื่อทำให้เกิดระดับพลังงานระดับลึก ด้วยการฉายรังสีอิเล็กตรอน ตำหนิเหล่านี้มีคุณสมบัติทำให้เกิดระดับลึกในแถบพลังงานของซิลิคอน ซึ่งระดับพลังงานดังกล่าวจะประพุดิตัวเป็นศูนย์กลางการจับยึด การรวมตัวใหม่ ทำให้ค่าอายุการเกิด และค่าอายุการรวมตัวใหม่ ของพหุพหุเปลี่ยนแปลง ซึ่งจะส่งผลให้คุณสมบัติของสารกึ่งตัวนำ และลักษณะสมบัติของไดโอดกำลังเปลี่ยนแปลงด้วย ในงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาวิธีการการปรับค่าของอายุพหุพหุ หาเงื่อนไขการทดลอง และศึกษาผลของการควบคุมอายุของพหุพหุที่มีต่อพฤติกรรมของไดโอดกำลังแบบซิลิคอน ทั้งนี้เพื่อนำข้อมูล วิธีการ และผลการวิเคราะห์ต่างๆ ที่ได้ มาใช้สำหรับการเพิ่มประสิทธิภาพของซิลิคอนไดโอด

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงนำเสนอผลของการแพร่แพลตตินั่มเพื่อควบคุมอายุของพหุพหุส่วนน้อยในซิลิคอนไดโอดแบบรอยต่อพีเอ็น ทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบตัวแปรสำคัญของไดโอด ได้แก่ กระแสขณะไบอัสตรงกระแสรั่วขณะไบอัสย้อนกลับ และค่าอายุของพหุพหุ นำเสนอการแยกส่วนประกอบ และวิเคราะห์กระแสรั่วไหลรอยต่อของซิลิคอนไดโอดแบบ PiN หลังผ่านการเติมด้วยอะตอมแพลตตินั่ม ณ อุณหภูมิการแพร่ 850 °C และ 900 °C และทำการเปรียบเทียบกับไดโอดที่ไม่เติมอะตอมแพลตตินั่ม และพบว่าค่ากระแสรั่วเพิ่มขึ้นหลังแพร่ด้วยอะตอมของแพลตตินั่ม ทั้งนี้เนื่องจากความหนาแน่นอะตอมสารเจือ และ/หรืออายุการรวมตัวของพหุพหุลดลง ส่วนการเพิ่มขึ้นของค่าความต้านทานอนุกรม และการลดลงของค่าความจุไฟฟ้า เกิดเนื่องจากการลดลงของความหนาแน่นอะตอมสารเจือหลังแพร่ด้วยอะตอมของแพลตตินั่มเล็กน้อย ทั้งนี้เนื่องจากการอะตอมของแพลตตินั่มในสารกึ่งตัวนำซิลิคอนทำให้เกิดระดับลึกในแถบพลังงานของซิลิคอน ผลการทดลองพบว่าไดโอดที่ผ่านการเติมด้วยอะตอมแพลตตินั่มจะมีกระแสรั่วไหลรอยต่อมากขึ้น และแปรผันตรงกับอุณหภูมิการแพร่ จากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างลักษณะสมบัติกระแส และค่าส่วนกลับของอุณหภูมิ และพบว่าการเพิ่มขึ้นของกระแสรั่วไหลรอยต่อเนื่องมาจากอะตอมของแพลตตินั่มทำให้ระดับพลังงานจับยึดในแถบพลังงานของซิลิคอนเปลี่ยนแปลง ส่งผลต่อกลไกการเกิดกระแสรั่วไหล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รอยต่อของไดโอด ซึ่งระดับพลังงานดังกล่าวจะประพุดิตัวเป็นศูนย์กลางการจับยึด การรวมตัวใหม่ ทำให้ค่าอายุการเกิด และค่าอายุการรวมตัวใหม่ ของพาหะเปลี่ยนแปลง โดยจะส่งผลให้คุณสมบัติของสารกึ่งตัวนำ และลักษณะสมบัติของไดโอดเปลี่ยนแปลงด้วย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] K.P. Lisiak, A.G. Milnes, Platinum as a lifetime control deep impurity in silicon, Journal of applied Physics, 46, (1975), 5229-35
- [2] D.K.Schroder, "Carrier lifetimes in silicon", IEEE Trans. Electron Devices, ED-44, p.160 ,1997.
- [3] V.K Khanna, "Physical understanding and technological control of carrier lifetimes in semiconductor materials and devices: A critical and conceptual development, state of art and applications", Progress in Quantum Electronics 29 p 59-163, 2005.
- [4] K.P. Lisiak, A.G. Milnes, "Platinum as a lifetime control deep impurity in silicon", Journal of applied Physics, 46, p.5229-35, 1975.
- [5] S.K.Ghandi, Semiconductor Power Devices, Wiley, New York, 1977
- [6] R.N.Hall, "Electron-hole recombination in germanium",Phys.Rev.,87, p.387 (1952)
- [7] W.Shockley and W.T.Read, "Statistics of the recombination of holes and electrons", Phys. Rev.,87, p.835, (1952)
- [8] V.K Khanna,; Physical understanding and technological control of carrier lifetimes in semiconductor materials and devices: A critical and conceptual development, state of art and applications, Progress in Quantum Electronics 29 (2005), 59-163
- [9] C.T Sah, R.N.Noyce and W.Schockley: Carrier generation and recombination in P-N junctions and P-N junction characteristics, Proceedings of IRE, 45 (1957), 1228-1243
- [10] Benda, V.: The influence of the copper diffusion on parameters of power diodes, Proc. MIEL'89 Conf. (Nis,1989), Vol.2, pp.725-730
- [11] A.G. Milnes, Deep Impurities in Semiconductors, J.Wiley & Sons, New York, 1973
- [12] Weber E.: Transition Metals in Silicon, Applied Physics, A 30,1983, 1-22
- [13] Benda, V.: A Note on Trap Recombination in High Voltage Device Structures. Microelectronics Reliability. 2005, vol. 2005, no. 45, s. 397-401
- [14]. Benda, V,, Gowar J., .Grant, D.A: Power Semiconductor Devices:Theory and Applications, Wiley, Chichester, 1999
- [15] M.C.Johnson, et al.,Correlation between local segments characteristics and dynamic current redistribution in GTO power thyristors, IEE trans. On Electron Devices, 41, 1994, 793

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

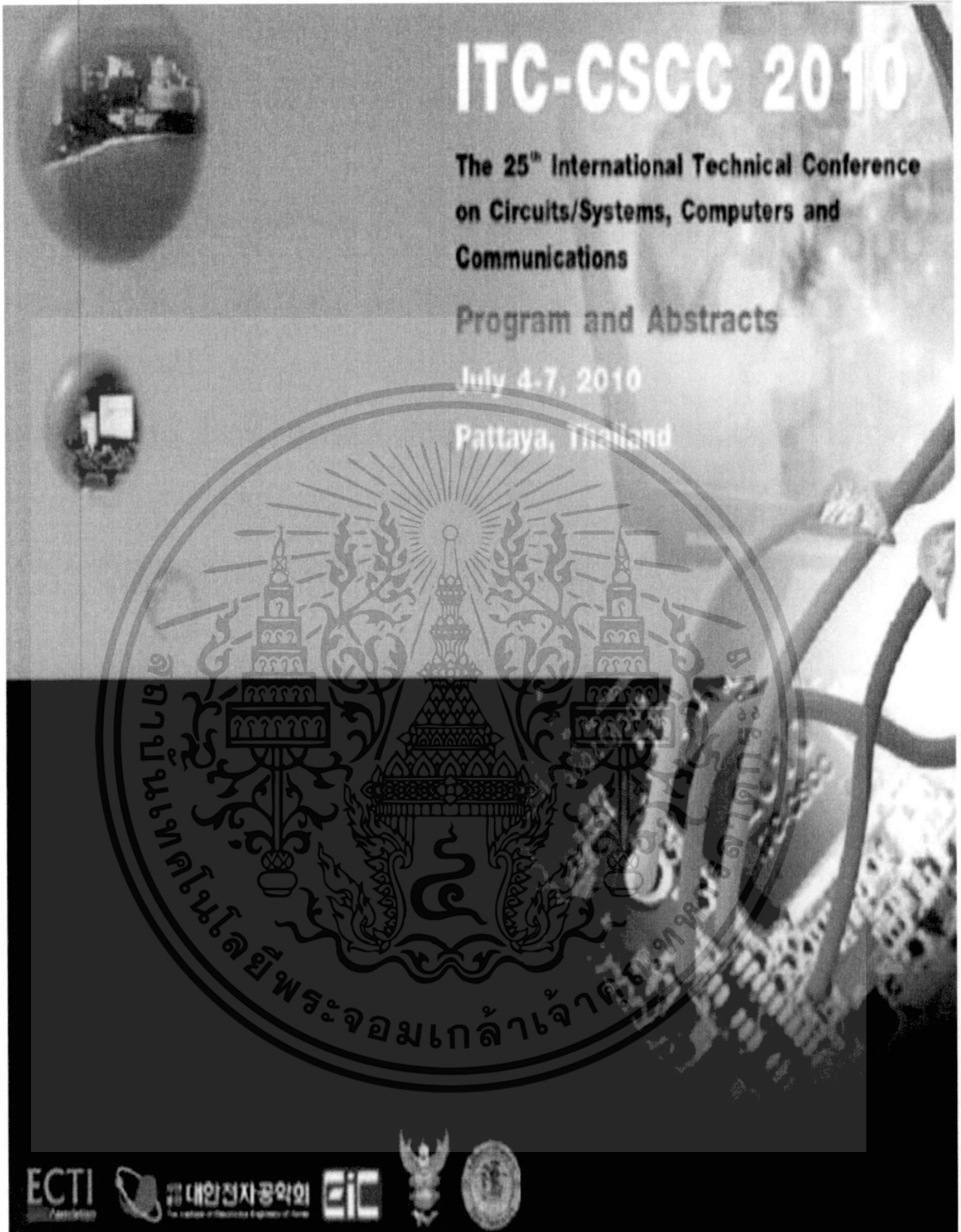
- [16] Schulze, H.-J., Kolbesen, B.O., Influence of silicon crystal defects and contamination on electrical behaviour of power devices, *Solid-State Electronics*, Vol.42, 1998, 2187-2197
- [17] Gilles,O., Ewe,H.: *Gettering phenomena in silicon*, Semiconductor Silicon 1994 (ed.H.R.Huff, W.Bergholz, K.Sumino), p.772, 1994
- [18] B.J.Baliga, *Power Semiconductor Devices*, PWS Publishing Company (1996)
- [19] Benda, V.: Design considerations for fast soft reverse recovery diodes, *Proc. EPE'93 Conf.*,Vol.2, pp.288-292
- [20] Lutz , J., Axial Recombination Centre Technology for Freewheeling Diodes, *Proceedings EPE'97*, Trondheim, (1997) 1.502 - 6.
- [21] W.M. Bullis, "Properties of Gold in Silicon", *Solid State Electronics*, Vol.9, p.143, (1966)
- [22] V. Benda, et al., Deep energy levels in power diodes introduced by palladium diffusion, *Proc. ISSE'95* (1995), 172-177
- [23] V. Benda, D.Stepkova and J.Fucikova, "Deep levels in N-type silicon introduced by palladium diffusion", *Proc. CAS-95 Conf*, p.163, (Sinaia, 1995)
- [24] Benda, V. - Cerník, M. - Stepkova, D.: Deep energy levels in power diodes introduced by iridium diffusion. *Microelectronics Journal*. 1998, vol. 29, no. 1, s. 695-699
- [25] V. Benda, M. Cernik, Fast soft reverse recovery diodes and thyristors with axial lifetime profile created by iridium diffusion, *Proc.IPEMC'2004*, vol.1. (2004), 332-337
- [26] Frisina, F., et al: Application of Ion Implantation to the Control of Dynamic Characteristics in Power Devices, *Proc. EPE-MADEP*, 0-053,1991
- [27] A. Holmes-Siedle, L. Adams, *Handbook on Radiation Effects*,Oxford University Press, New York, 1994
- [28] R.O. Carlson, Y.S.Sun, H.B.Assalit, Lifetime kontrol in silicon power device by elektron or gamma irradiation, *IEEE Transaction on Elektron Device*, ED-24 (1977) 1103-1108
- [29] Benda, V., Kozisek, J: In-Process Monitoring of Carrier Lifetime Distribution in Technology of Large-Area Power Semiconductor Devices, *Proc. PEMC'98 Conf.* (Prague, 1998), Vol..1, p.1-26

- [30] Stojadinovic, N. et al: Modeling radiation-induced mobility degradation in MOSFETs, Phys. Stat. Sol.(a), 169, p.63, 1998
- [31] Wondrak, W., Nowak, D. and Thomas, B: Proton implantation for power silicon devices, Proc. ISPSD'88, (1988), 147
- [32] Wondrak, W. and Boos, A.: Helium implantation for lifetime control in silicon power devices, Proc.ESSDERC'87, (1987), 649
- [33] P.Hazdra, J. Vobecky, Application of high energy ion beams for local lifetime control in silicon, Material Science Forum, vols.248-249 (1997), 225-228
- [34] Siemieniec R., Schulze H.-J., Niedernostheide F.-J., Sudkamp W., Lutz J., Compensation and doping effects in heavily helium-radiated silicon for power device applications, Microelectronics Journal, 2006, 37, pp. 204-212
- [35] M. Skaloud, V. Benda, Czechoslovak Author certificate AO2643, (1990)
- [36] B. Holm, K.B. Nielsen, Spatial confinement and saturation of substitutional platinum by diffusion into ion-beam damaged silicon, Journal of Applied Physics, 78, 5970-5974, 1995
- [37] J. Vobecky, P. Hazdra, Local lifetime control by means of palladium, Proc. ISPS'06, 2006, 217-221
- [38] A. Poyai, E. Simoen, C. Claeys, A. Czerwinski, "Silicon substrate effects on the current-voltage characteristics of advanced p-n junction diodes" Materials Science and Engineering B73, p.191-196, 2000.

## ภาคผนวก

### ผลงานวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์ในวิทยานิตยสารนี้

- [1] **Jirawat Prabket** , Montree Saenlamool , Wittawat Yamwong , Udom Techakijkajorn, Amporn Poyai, Wisut Titiroongruang, “Improving Forward Current Density of Silicon PIN Diodes by Pt-Diffusion Method” The 25<sup>th</sup> International Technical Conference on Circuits/Systems, Computer and Communications (ITC-CSCC 2010) Ambassador Pattaya, Thailand on July 4-7, 2010
- [2] **Jirawat Prabket**, Wiwat Itthikusaman, Narin Attiwongsangthon, Amporn Poyai , Wisut Titiroongruang, “Evaluation of Schottky barrier parameters of Al Schottky contacts on Platinum Doped n-Silicon”, 9<sup>th</sup> International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON), Cha Am Beach, Thailand May 16-18, 2012.
- [3] **Jirawat Prabket**, Itsara Srithanachai, Surada Ueamanapong, Amporn Poyai, Wisut Titiroongruang, Surasak Niemcharoen and Preecha P. Yupapin, “An improvement of electrical characteristics of P-N diode by X-ray irradiation method” Scientific Research and Essays Vol. 7(11), pp. 1230-1236, 23 March, 2012



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# IMPROVING FORWARD CURRENT DENSITY OF SILICON PIN DIODES BY Pt-DIFFUSION METHOD

Jirawat Prabket<sup>a,\*</sup>, Montree Saenlamool<sup>b</sup>, Wittawat Yamwong<sup>b</sup>, Udom Techakijakajorn<sup>b</sup>, Amporn Poyai<sup>b</sup>, Wisut Titiroongruang<sup>a</sup>

<sup>a</sup> School of Electronics Engineering, Faculty of Engineering  
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang  
3 Moo 2, Chalongkrung Road, Ladkrabang, Bangkok, Thailand

<sup>b</sup> Thai Microelectronics Center (TMEC), National Electronics and Computer Technology Center,  
51/4 Moo 1, Wang-Takien District, Amphur Muang, Chachoengsao 24000, Thailand

\* E-mail: jirawat.prabket@nectec.or.th

## ABSTRACT

This paper presents the improving forward current density of the PIN diodes by Pt-diffusion method were studied. The *IV* and *CV* characteristics of the Si PIN diodes fabricated on undoped and two different temperature Pt-doped were measured. The area current density ( $J_A$ ) versus width ( $W_A$ ) characteristics were used to extract the generation lifetime ( $\tau_g$ ) and recombination lifetime ( $\tau_r$ ). The forward current density ( $J_F$ ) and reverse current density ( $J_R$ ) of the Pt-doped diodes increase approximately 1 decade, and less than 1 time, respectively, when comparison with the undoped. Both  $\tau_g$  and  $\tau_r$  decreased when diffusion temperature increased. Analysis of the data indicated that forward current density of the Si PIN diode can be improved by reducing carrier recombination lifetime.

**Index Terms** — PIN diodes, current density, Pt-diffusion, deep level, carrier lifetime.

## 1. INTRODUCTION

The demand for smaller, higher power density power systems requires the development of novel power diode capability. Therefore, improving forward current density in the power diode can increase the performance of the device where it is inversely proportional to the carrier lifetimes [1]. Pt introduces deep trap levels into the bandgap of silicon and is widely used as minority carrier lifetime killers in high power devices [2]. In the fabrication of such devices, platinum are introduced into silicon by a high-temperature diffusion process starting from different sources of metal: evaporation of platinum on the surface, platinum silicide, etc.

In the present paper the improving forward current density of the PIN diode by Pt-diffusion method are studied and compared. We present the effect of Pt diffusion for minority carrier lifetime control on the improving forward characteristics of silicon PIN diodes. We propose that Pt introduce deep trap level into the bandgap of silicon and used as minority carrier lifetime killers in silicon diodes providing maximal of the forward current density.

## 2. EXPERIMENTAL

The Si PIN diodes compatible with CMOS technology were fabricated on 6 inch in diameter,  $N/N^+$ -epitaxial wafers by TMEC facilities. The  $P^+$  anode for this devices were used a boron ion implant on  $N$ - epitaxial substrates. Undoped and two different Pt-doped temperatures of 850°C and 900°C, respectively, of the Si PIN diodes were studied and compared.

The *IV* and the *CV* measurement have been performed on diode with different geometry, as shown in Table 1. The *IV* and the *CV* characteristics of the diodes were measured with applied voltages ranging from -5 to 1V and 0 to -5 V, respectively. The  $\tau_g$  and  $\tau_r$  extracted from  $J_A$  versus  $W_A$  characteristics [3].

**Table 1.** Comparison of the diodes with different geometry ( $A$  is the area,  $P$  is perimeter and  $N_C$  the number of corners)

Diode	$A$ (cm <sup>2</sup> )	$P$ (cm)	$N_C$ (no.)
SQ1	0.0016	0.16	4
ST1	0.001	0.72	40
ST2	0.001	1.152	320

## 3. RESULTS AND DISCUSSIONS

Fig. 1 shows typical *IV* characteristics of Si PIN diodes for undoped and two different temperature Pt-doped. From this figure, it is noted that both the reverse and forward current increase by Pt-diffusion. An interesting observation is, however, that the forward current decreases after Pt-diffusion for a forward voltage larger than 0.7 V. This reduction can be explained by an increased resistivity of the substrate [4]. The current density ( $I/A$ ) versus perimeter ( $P$ ) to junction area ( $A$ ) ratio ( $P/A$ ) at a voltage of  $V_R=5V$  and  $V_F=0.5V$  for the Si PIN diodes for undoped and Pt-doped temperatures of 850°C and 900°C are shown in Fig.2.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์หรือการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

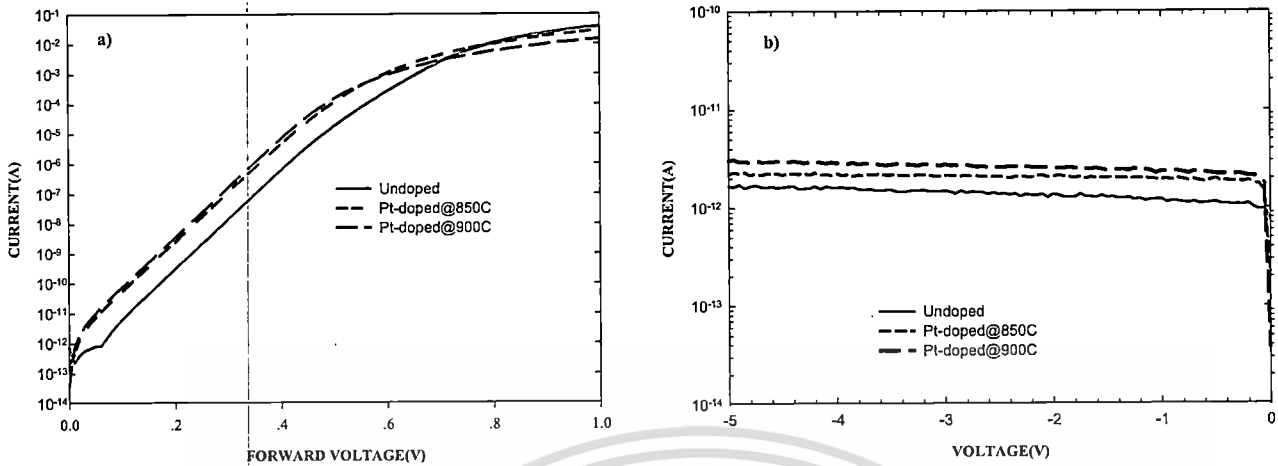


Fig.1. Current-voltage (a) forward and (b) reverse characteristics for Si PIN diodes for undoped and two different Pt-doped diodes.

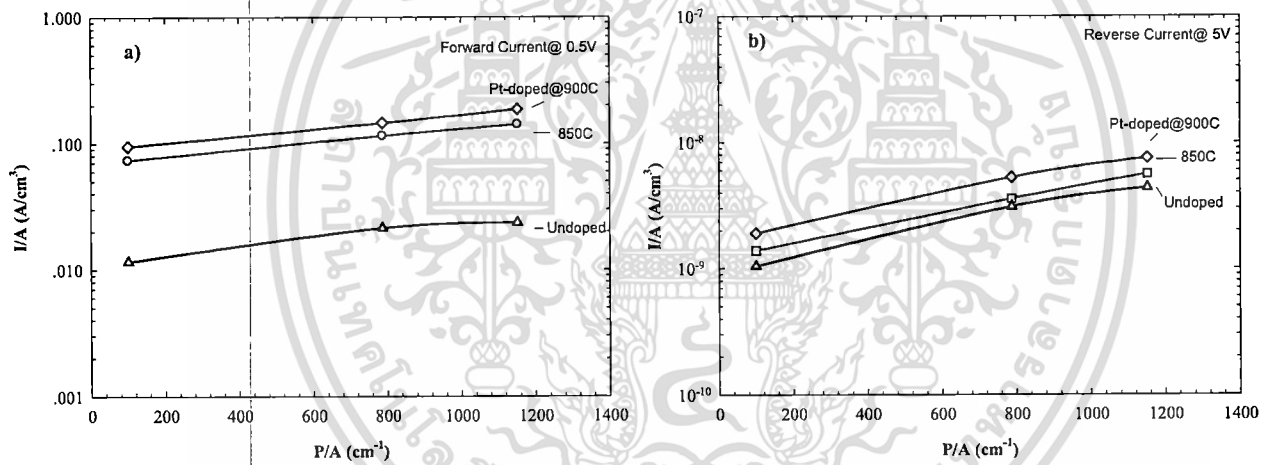


Fig.2. The (a) forward and (b) reverse current density ( $I/A$ ) versus perimeter ( $P$ ) to junction area ( $A$ ) ratio ( $P/A$ ) at a voltage of  $V_R=5V$  and  $V_F=0.5V$  for Si PIN diodes for undoped and two different Pt-doped diodes.

Theoretically, the current of a p-n junction consists of different geometrical components, namely, the area (or volume) leakage current  $I_A$  and the perimeter leakage current  $I_P$ . For smaller device sizes a possible corner contribution,  $I_C$ , proportional to the number of corners  $N_C$  of the test structure, might become important. As a result, one can write for  $I$  [5]:

$$I = I_A + I_P + I_C + I_{par} = AJ_A + PJ_P + N_C J_C + I_{par} \quad (1)$$

with  $I_{par}$  a parasitic current, related to the device and measurement system parasitics and  $J_A$ ,  $J_P$  and  $J_C$  the current densities corresponding to the different components mentioned above.

From Fig. 2, the slope should give the perimeter current density ( $J_P$ ) and the intercept, area current density ( $J_A$ ) [5]. The  $J_A$  is mainly generated by defects in the Si bulk, while  $J_P$  is strongly perimeter of the junction. Both forward current density ( $J_F$ ) and reverse current density ( $J_R$ ) increase with  $P/A$  ratio where  $J_F$  and  $J_R$  of the Pt-doped diodes increase approximately 1 decade, and less than 1 time, respectively, when comparison with the undoped diodes.

Fig. 3 shows typical  $CV$  characteristics for Si PIN diodes for undoped and two different temperature Pt-doped. After Pt-diffusion, the capacitance small decreases due to impurities as a carrier trapping of the phosphorus dopants.

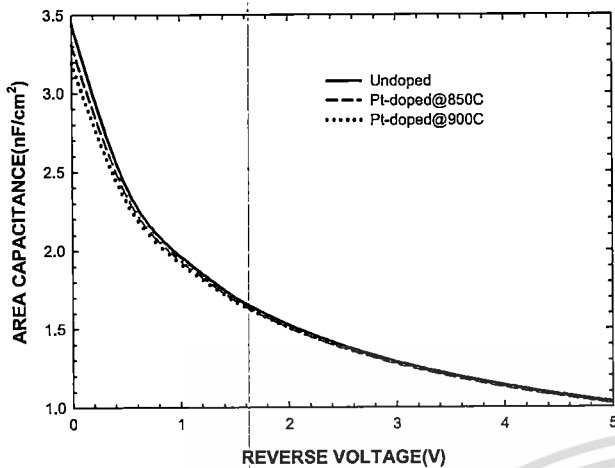


Fig.3. Area capacitance-voltage characteristics for Si PIN diodes for undoped and two different Pt-doped diodes.

Fig. 4 show the normalized area capacitance of undoped and two different Pt-doped diodes. With respect to the CV characteristics, there is also only a small difference between the effects of Pt-diffusion on Si PIN diodes characteristics.

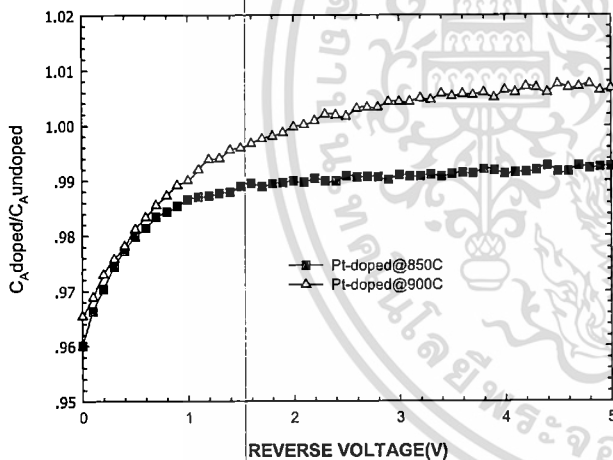


Fig.4. Normalized area capacitance for Si PIN diodes for two different Pt-doped diodes.

Fig.5 shows the  $J_A-W_A$  characteristics of undoped and two different Pt-doped diodes. Using the following detailed in [3], these calculated values are listed in Table 2. From Table 2, shows that both  $\tau_g$  and  $\tau_r$  decreased when diffusion temperature increased. By using a  $\tau_g/\tau_r$  ratio, a dominant effective trap level situated at about 0.15 eV from the intrinsic midgap position could be estimate [6].

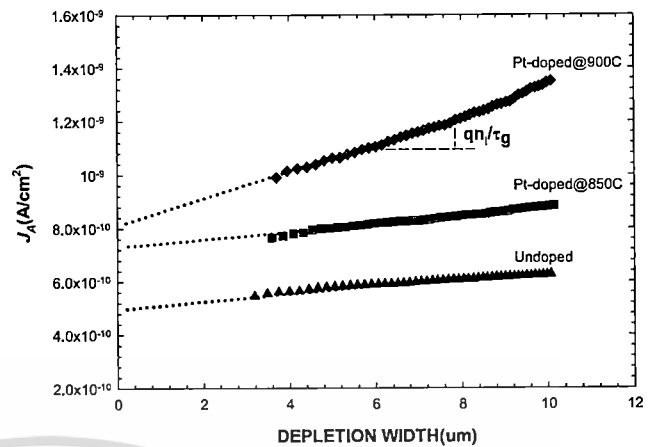


Fig.5.  $J_A$  versus width characteristics for undoped and two different Pt-doped diodes. The generation lifetime ( $\tau_g$ ) and recombination lifetime ( $\tau_r$ ) extracted from the slope of linear region and the intercept, respectively.

Table 2. Comparison of the generation lifetime ( $\tau_g$ ) and recombination lifetime ( $\tau_r$ ) extracted from  $J_A$  versus width characteristics for undoped and two different Pt-doped diodes.

Diode	$\tau_g$ (ms)	$\tau_r$ ( $\mu$ s)	$ E_T - E_i $ (eV)
Undoped	2.62	6.55	0.15
850C	1.88	3.49	0.15
900C	1.15	2.79	0.16

From a comparative study of IV and CV characteristics in undoped and Pt-doped, the deep levels affected to electrical properties of silicon PIN diodes because of their carrier trapping, and then the current density was modified. The deep levels are characterized in generation and recombination lifetime obtained from the recombination current, and  $|E_T - E_i|$  derived from the lifetime ratio of the diodes.

#### 4. CONCLUSION

The forward current density of the Si PIN diode can be improved by reducing carrier recombination lifetime. With respect to IV and CV characteristics, there were used as tools to find the physics parameters to describe the behavior of the device.

## 5. ACKNOWLEDGMENTS

J.Prabket was supported the scholarship from TGIST, NSTDA through the Grant no. TG-66-22-51-106D.

## 6. REFERENCES

- [1] V.Benda, "Carrier lifetime control in power semiconductor devices," IWPSD 2007.
- [2] M.D.Miller, "Comparison of gold, platinum, and electron irradiation for controlling lifetime in power rectifiers," IEEE Trans. Electron Devices, VOL.24, NO.6, pp.685-688, 1977.
- [3] Y. Murakami and T. Shingyouji, "Separation and analysis of diffusion and generation components of pn junction leakage current in various silicon wafers," J. Appl. Phys. 75, pp.3548-3552, 1994.
- [4] D.K. Schroeder, "Semiconductor material and device characterization," Wiley & Sons Inc, New York, 1990.
- [5] A.Poyai, "Defect assessment in advanced semiconductor materials and devices," PhD.thesis, KU Leuven, Belgium, 2002.
- [6] D.K.Schroder, "Carrier lifetimes in silicon," IEEE Trans. Electron Devices, VOL. 44, NO. 1, pp.160-170, 1997.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



2012

# BOOK OF ABSTRACTS

16-18 May 2012  
Phetchaburi, THAILAND



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# Evaluation of Schottky barrier parameters of Al Schottky contacts on Platinum Doped n-Silicon

Jirawat Prabket, Wiwat Itthikusaman

Narin Attiwongsangthong Wisut Titiroongruang  
School of Electronics Engineering, Faculty of Engineering,  
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang,  
3 Moo 2, Chalongkrung Road, Ladkrabang, Bangkok,  
10520, Thailand

E-mail : jirawat.prabket@nectec.or.th

Amporn Poyai

Thai Microelectronics Center (TMEC),  
National Electronics and Computer Technology Center,  
51/4 Moo 1, Wang-Takien District, Amphur Muang,  
Chachoengsao, 24000, Thailand  
E-mail : amporn.poyai@nectec.or.th

**Abstract**—The current-voltage (I-V) and capacitance-voltage (C-V) measurements of Aluminum (Al) Schottky contacts on undoped and platinum-doped NTD n-Silicon were carried out in the temperature range of 300-420 K. The I-V and C-V characteristics were used to extract the saturation current, the ideality factor and the Schottky barrier height of the diodes. These parameters were correlated to the defect levels generated by the Pt in silicon. The results show that the saturation current of Pt doped diode is reduced and the Schottky barrier height of the diode is higher than from that of the diodes fabricated on undoped silicon diodes. This high value of the Schottky barrier height shows that Pt in silicon creates donor levels in the energy gap that compensate electrons to reduce the conductivity of the material. Such the Pt doped diodes have been found to perform better as low loss rectifiers due to there have less leakage current than undoped devices.

**Keyword:** Al-Schottky Contact; Schottky barrier; platinum-doped NTD silicon; deep level.

## I. INTRODUCTION

Doping silicon with metals was initially carried out in order to reduce the switching time of electronic devices [1]. Platinum(Pt) was preferred mainly because in silicon it acts as a lifetime killer. Since the carrier lifetime is reduced in this case, it follows that the material would be in a relaxation state. Much research has been carried out to investigate the effects of platinum on the electrical properties of silicon diodes [2]. At this stage, the results obtained from these studies have not been fully analyzed nor understood. In this work, Schottky barrier diodes were fabricated on undoped and on Pt-doped n-silicon. Pt in silicon has also been found to create three different defect levels at  $E_c-0.23$  eV, at  $E_c-0.52$  eV and at  $E_v+0.36$  eV [3]. The donor level in the lower half of the energy gap is more active than the acceptor level in the upper half. It is thus expected that after platinum-doping the conductivity of the material will be reduced as the donor level compensates any majority carriers. In this work, the diodes were characterized using the I-V, I-T and C-V techniques. These techniques are used to determine the saturation current, the ideality factor and the Schottky barrier height[4]. The

results were used to investigate the effects of the Pt on the silicon by inference from the electrical properties of the diodes.

## II. EXPERIMENTAL

The Schottky contacts diodes compatible with CMOS technology were fabricated on 6 inch in diameter,  $N^+/N^+$  - NTD wafers. After cleaning processes, a Pt layer is evaporated on the wafer back side and then thermally diffused of the metal into the bulk. The Schottky contact was formed by RF sputtering of AlCuSi onto the both side of the substrates. The I-V and C-V characteristics were measured, using Agilent B1500A Semiconductor Device Analyzer. Cascade Microtech M150 probe station with anti-vibration system and temperature controlled chuck was used. Wafer temperature was controlled with ERS Aircool SP72-300 thermo chuck in the range 300 to 420 K. The I-V and the C-V characteristics of the diodes were measured with applied voltages ranging from -5 to 2V and 0 to -5 V, respectively, with a voltage step of 0.01 V. Undoped and Pt-doped temperatures of 850°C of the Schottky contacts diodes were studied and compared.

## III. RESULTS AND DISCUSSION

The I-V characteristics are used widely to study the behavior of devices since they offer important parameters such as the saturation current, the ideality factor and the Schottky barrier height. Fig. 1 shows I-V characteristics for the diodes fabricated on undoped and Pt-doped n-type Si substrate. The reverse current of the Pt-doped diode shows a lorder of magnitude reduction. These significant reductions in reverse current are due to the significant increase in barrier height. From the thermionic current-voltage relationship of a Schottky barrier diode is given by

$$I = AA^*T^2 e^{-q\phi_B/kT} (e^{qV/\eta kT} - 1) = I_s (e^{qV/\eta kT} - 1) \quad (1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\phi_B = \frac{kT}{q} \ln \left( \frac{AA^*T^2}{I_s} \right) \quad (2)$$

Where  $A$  is the area of the diode while  $A^*$  is the Richardson constant given as  $112 \text{ Acm}^{-2}\text{K}^{-2}$  for n-type silicon.

The expanded I-V curve for the diodes fabricated on undoped and Pt-doped n-type Si substrate in fig. 2 allows the slope to be determined from which  $\eta = 1.06$  and  $1.04$ , from the  $V = 0$  intercept of  $I_s = 2.16 \times 10^{-9}$  and  $5.08 \times 10^{-10}$  A, the barrier height ( $\phi_{B(I-V)}$ ), calculated from Eq. (2), is  $0.76$  and  $0.80$  eV, respectively.

Typical forward I-V characteristics of the undoped and Pt-doped Schottky diode in the temperature range of  $300\text{-}420$  K are shown in fig. 3. The Schottky barrier heights can be determined from a  $\ln(I_F/T^2) - q/kT$  plot for a given forward bias  $V_F$  by [1]

$$\ln \left( \frac{I_F}{T^2} \right) = \ln(AA^*) - \frac{q(\phi_B - V_F)}{\eta kT} \quad (3)$$

Where  $A$  is the diode area,  $A^*$  is the Richardson's constant,  $\phi_B$  is the effective barrier height, and  $\eta$  is the ideality factor.

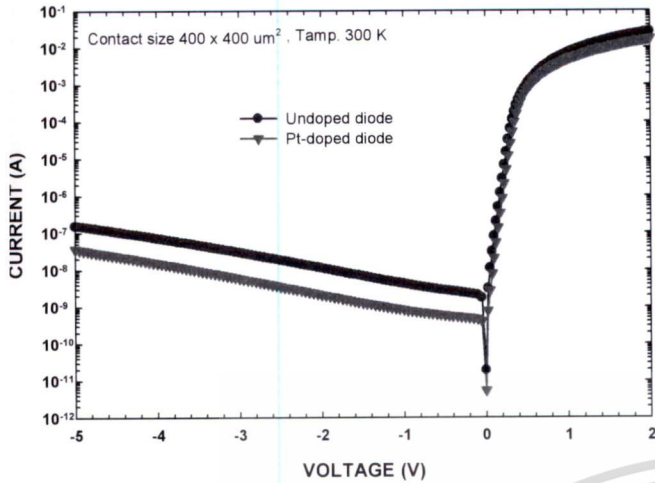


Fig. 1. The I-V characteristics of diodes fabricated on undoped and Pt-doped n-type Si substrate.

Where  $I_s$  is the saturation current,  $A$  is the diode area,  $A^*$  is the Richardson's constant,  $\phi_B$  is the effective barrier height, and  $\eta$  is the ideality factor.

When plotting  $\log[I/(1 - \exp(-qV/kT))]$  versus  $V$ , the data are linear all the way to  $V = 0$ , also shown in fig. 2.

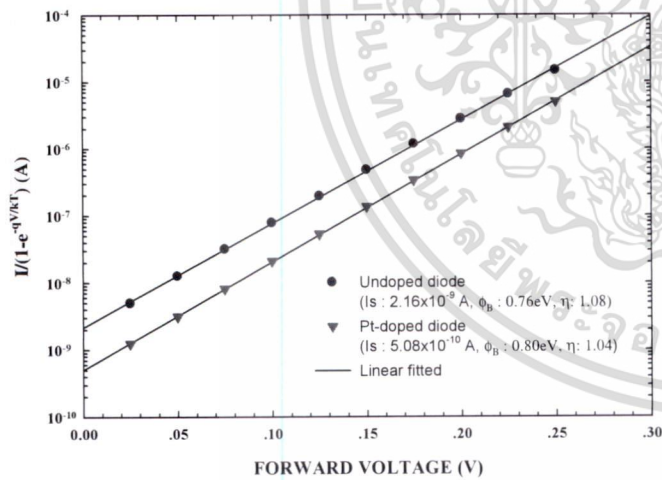


Fig. 2. Determination of saturation current from  $\log[I/(1 - \exp(-qV/kT))] - V$  of the undoped and Pt-doped diode

The barrier height is most commonly calculated from the current  $I_s$ , determined by extrapolating the semilog I versus V curve to  $V = 0$ . The barrier height  $\phi_B$  is calculated from  $I_s$  in Eq. (1) according to [1].

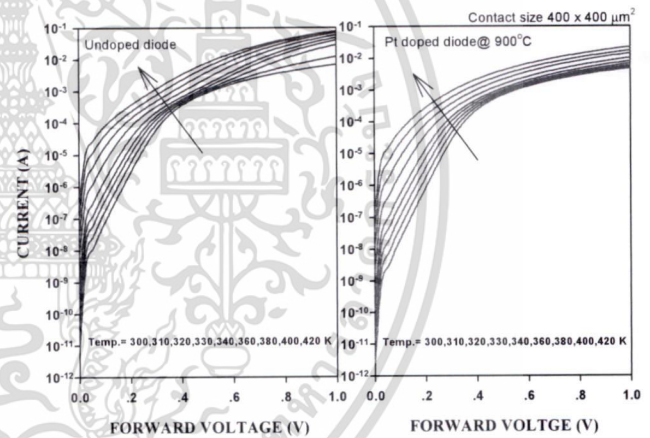


Fig. 3. Typical I-V characteristics of the undoped and Pt-doped diode in the temperature range of  $300\text{-}420$  K.

Fig. 4 shows the  $\ln(I_F/T^2) - q/kT$  plot between  $300$  and  $420$  K for the diodes fabricated on undoped and Pt-doped n-type Si substrate, which gives an barrier height ( $\phi_{B(I-T)}$ ) of  $0.70$  and  $0.77$  eV, respectively.

The Schottky barrier heights can also be determined from the voltage intercept in plotting  $1/C^2$  versus the reverse voltage. Using the following

$$\phi_B = V_i + V_n + \frac{kT}{q} \quad (4)$$

Where  $V_i$  is the voltage intercept,  $V_n$  is the depth of the Fermi level below the conduction band, and  $kT$  is the thermal energy.

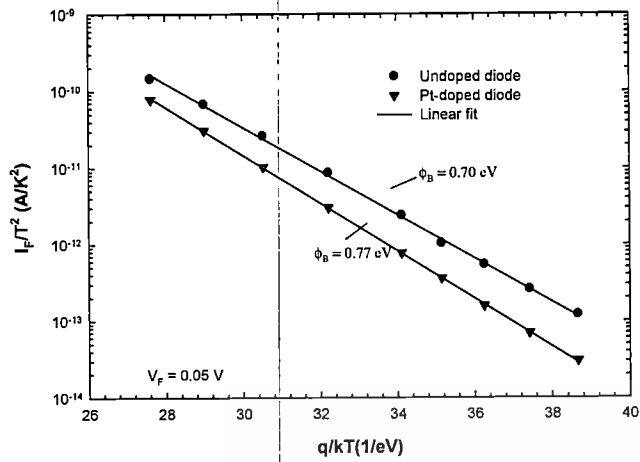


Fig. 4. Richardson plot of the undoped and Pt-doped diode measured at  $V = 0.05V$ .

Fig. 5 is a C-V characteristic for all devices measured at 300 K and at 100 kHz. Fig. 6 shows  $1/C^2 - V$  plots for the diodes fabricated on undoped and Pt-doped n-type Si substrate. The doping concentration in the sample can be extracted from the slope of the  $1/C^2 - V$  plots, which are  $1.20 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$  for the undoped sample and  $1.10 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$  for the Pt-doped sample, respectively. The Schottky barrier heights ( $\phi_{B(C-V)}$ ) are 0.63 and 0.70 eV for the undoped and Pt-doped sample, respectively.

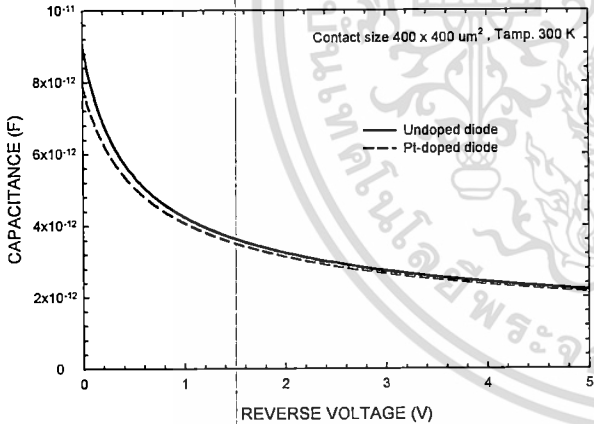


Fig.5. A reverse C-V characteristic for the diodes fabricated on undoped and Pt-doped n-type Si substrate.

These results show that the effects of platinum in silicon have been studied. The parameters evaluated for platinum-doped diodes are presented in table I where a high ideality factor in undoped diode corresponds to a high saturation current while a low ideality factor in Pt-doped diode corresponds to a high Schottky barrier height.

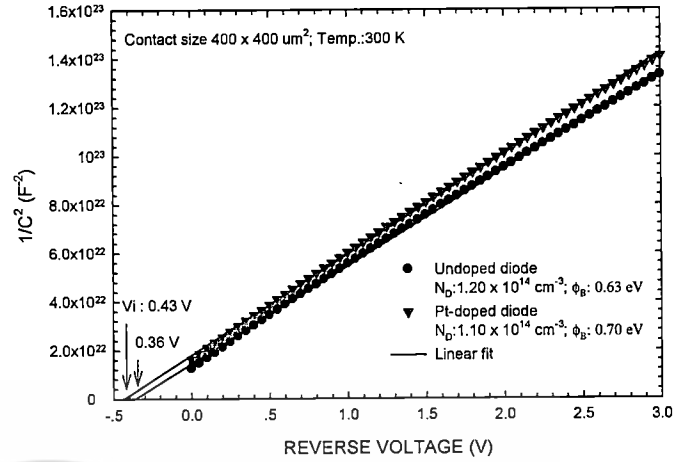


Fig. 6. Extraction of Schottky barrier heights from  $1/C^2 - V$  for the diodes fabricated on undoped and Pt-doped n-type Si substrate.

TABLE 1. Summary of measured Schottky barrier heights undoped and Pt-doped Si substrate

Diode	$I_s(A)$	$\eta$	$\phi_B$ (I-V)	$\phi_B$ (I-T)	$\phi_B$ (C-V)
undoped	$2.16 \times 10^{-9}$	1.06	0.76	0.70	0.63
Pt-doped	$5.08 \times 10^{-10}$	1.04	0.80	0.77	0.70

#### IV. CONCLUSIONS

We have shown that the I-V and C-V measurements of Aluminum (Al) Schottky contacts on undoped and platinum-doped NTD n-Silicon. Furthermore, the reverse and forward bias current profiles have converged. These two properties of the diode current are caused by the midgap defect created by metals in the energy gap. By inference, this defect is the cause of the relaxation behavior of the material which means that the diodes are fabricated on relaxation silicon. These diodes are also expected to exhibit negative capacitance in forward bias. It must be noted that exact properties of the defect levels created by the metals in silicon are not investigated in this work.

#### V. ACKNOWLEDGMENT

The authors would like to thank researchers of the Thai Microelectronics Center for devices fabrication. The first author (JP) was supported the scholarship from TGIST, NSTDA through the Grant no. TG-66-22-51-106D.

## VI. REFERENCES

- 1] S.M. Sze, "Physics of Semiconductor Devices", second ed., Wiley, New York, 1981.
- 2] D. K. Schroder, "Semiconductor material and device characterization", John Wiley & Sons, Hoboken, New Jersey., pp. 157-162, 2006.
- [3] C.W. Wilmsen, Physics and Chemistry of III-V Compound Semiconductor Interfaces, Plenum, New York, 1985.
- [4] K. Cheung, N.W. Cheung, "Extraction of Schottky Diode Parameters from Forward Current-Voltage Characteristics," *Appl. Phys. Lett.* 49, pp.85-87, July 1986.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# Scientific Research and Essays

Volume 7 Number 11 23 March, 2012

ISSN 1992-2248



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

*Full Length Research Paper*

## An improvement of electrical characteristics of P-N diode by X-ray irradiation method

Jirawat Prabket<sup>1</sup>, Itsara Srithanachai<sup>1</sup>, Surada Ueamanapong<sup>1</sup>, Amporn Poyai<sup>2</sup>, Wisut Titiroongruang<sup>1</sup>, Surasak Niemcharoen<sup>1</sup> and Preecha P. Yupapin<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Electronics Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand.

<sup>2</sup>Thai Microelectronics Center (TMEC), 51/4 Moo 1, Wang-Takien District, Amphur Muang, Chachoengsao 24000, Thailand.

<sup>3</sup>Nanoscale Science and Engineering Research Alliance (N'SERA), Faculty of Science, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand.

Accepted 16 February, 2012

This paper presents a new technique of semiconductor fabrication technology, where a soft X-ray annealing method is proposed as a new technique and used in this work. The effect of Pt and Soft X-ray annealing on P-N diodes was investigated. The tested P-N diodes were fabricated at TMEC laboratory using CMOS technology. Results obtained have shown that the platinum doping is affected both reverse and forward current characteristics of P-N diode, the leakage current is increased slightly, while the forward current is also increased 3 to 4 times, which is a result of reduction of carrier recombination lifetime of diode from 72 to 55  $\mu$ s. The characteristics of P-N diode after X-ray irradiation is improved significantly. There is a slight reduction of leakage current, whereas the forward current is increased about 3 to 4 order of magnitude. Furthermore, the recombination lifetime is decreased from 54 to 48  $\mu$ s.

**Key words:** Soft X-ray annealing method, P-N diode, forward current.

### INTRODUCTION

P-N junction structures are widely used in many applications such as high switching diodes (Kuksenkov et al., 1997), oxygen sensors (Miller, 1976), power devices (Matsumoto et al., 2002), and optoelectronics devices (Wallgren and Sotiropoulos, 1999). Generally, a good diode should have low leakage current and high forward current (Poyai, 2002). However, P-N diodes can produce high leakage and low forward current due to defects during fabrication process. To further improve these properties, many researchers have tried to increase the performance of P-N junction diode. However, the performance target is always increased. Low performance characteristics of the diodes can have many reasons (Li et al., 2007; Li et al., 2011), where one of

them is the high energy ion implantation process. It is well-known that high energy ion implantation is essential for the fabrication of many devices. On the other hand, the ion implantation can introduce the damages which can bring dramatic effects on the diffusion of dopants, especially in the case of CMOS technology. Moreover, the ion implantation process can cause the crystalline structure damage in a silicon bulk. However, it has been observed that the residual damage can be repaired by using a thermal annealing process (Williams, 1998; Felner et al., 2003; Moffatt et al., 2000; Bourdelle et al., 2001).

Generally, the effect of ion implantation process has caused the higher leakage current and lower forward current characteristics. In this paper, the focus will be on the forward current characteristics. Furthermore, the forward current is also of particular interest for improvement, in which the high responsiveness diodes with low power loss require high forward current. One of

\*Corresponding author. E-mail: [kypreech@kmitl.ac.th](mailto:kypreech@kmitl.ac.th).

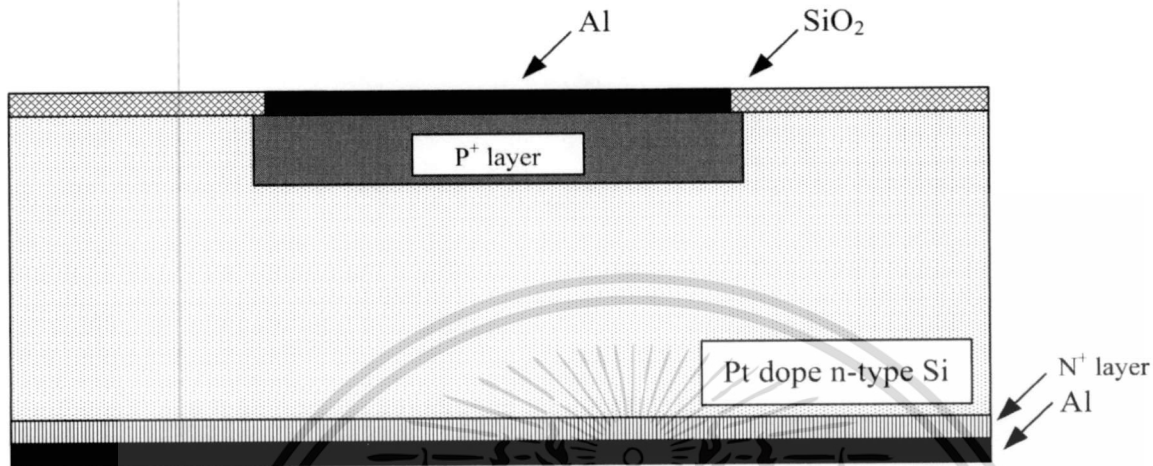


Figure 1. Device structure after fabrication.

the techniques for improving the forward current characteristics such as Pt-doping process is a popular technique to improving electrical characteristics of diode base on silicon. Pt-dope is extensively used in semiconductor device to improve the switching characteristics of the devices by decreasing the carrier lifetime. This, on the other hand, has the undesirable effect of increasing the material resistivity (Valdinoci et al., 1996).

As mentioned earlier, this technique has many associated problems that can decrease the performance of device. The Pt-dope technique can decrease the carrier lifetime but at the same time the series resistance of the diode can increase significantly (Miller et al., 1976; Williams, 1998; Ayyildiz et al., 1995). The series resistance is one of the important parameters in diode mechanism (Ayyildiz et al., 1995). At present, the damages from ion implantation process and Pt-dope are normally removed by thermal annealing technique (TAT). Although, TAT are widely used in many laboratories and industry, the performance of the device after TAT tends to be smaller than expected because some of the residual damages can be difficult to remove.

This paper presents a new technique for improving forward current characteristics of P-N diode. A soft X-ray annealing process was used for improving electrical characteristics of diodes. The soft X-ray irradiation is not widely used because few research works were done to confirm and find the appropriate X-ray energy ranges to be used in silicon based diode fabrication. An optimum X-ray energy and exposure time can be used to remove defects or damages in silicon devices [16]. The goal of this paper is to investigate the forward current of Pt-dope and undoped P-N diode, with various x-ray energy and exposure time.

## METHODOLOGY

The P-N junction diode was fabricated with CMOS technology at Thai Microelectronics Center (TMEC) laboratory. For this study, P-N junction diodes were fabricated on the 325  $\mu\text{m}$  thick n-type silicon substrate. The diode process module consisted of (i) deposition of silicon dioxide on the substrate, (ii) dry-etching of active area, (iii) implantation of boron at energy of 120 keV and dose of  $1 \times 10^{16}$  atoms/ $\text{cm}^2$  on the front side wafers (the implantation been followed by a thermal annealing at 1050°C for 60 min, resulting in a junction depth of about 1  $\mu\text{m}$ ), (iv) E-beam evaporation of Pt on the back side (v) thermal annealing at various temperatures between 850 and 900°C for 4 h, (vi) 1  $\mu\text{m}$  thick Al deposition on the front and back sides. The final device is as shown in Figure 1.

The tested wafer was cut into the 4  $\text{mm}^2$  diodes that were measured to find their electrical properties. The results obtained were compared in both before and after X-ray irradiation at room temperature with various energy exposures of 55 and 70 keV and exposure time of 55 and 205 seconds (Sundarasaradula et al., 2011; Srihanachai and Niemcharoen, 2011). The semiconductor parameter analyzer, model HP4156B, was used to measure the electrical properties of diode, before and after irradiation. The current-voltage (I-V) characteristics of the P-N diode were measured at room temperature to examine the change of the dark current ( $I_b$ ) by X-ray irradiation. The current-voltage (I-V) characteristics were measured on wafer with biasing step of 25 mV for both reverse ( $V_R$ ) and forward ( $V_F$ ) voltages.

## RESULTS AND DISCUSSION

The electrical properties of P-N junction diode after Pt doping and X-ray irradiation are examined. Figure 2 shows the experimental result for forward and reverse bias characteristics of the P-N junction diodes. The diode parameters are determined from the I-V characteristics, which usually describe using the thermionic emission theory. The ideal diode equation or sometimes called the Shockley diode equation is given by:

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

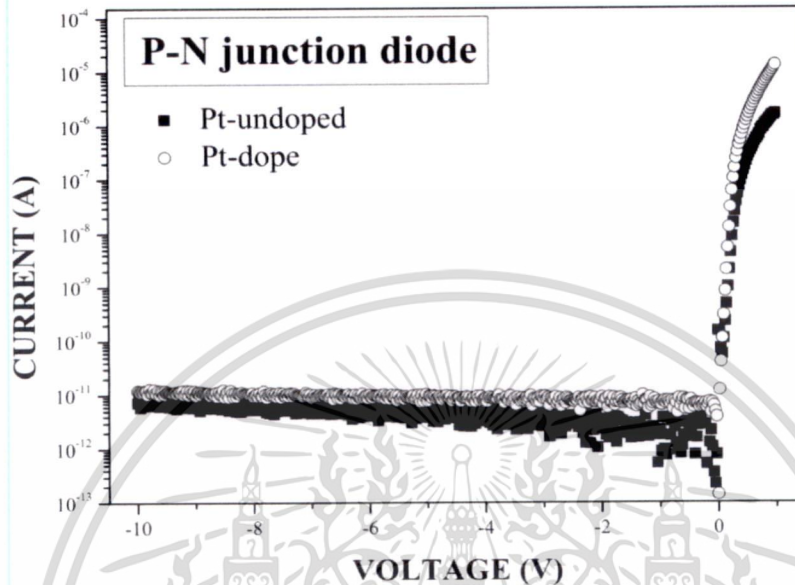


Figure 2. Semi-log I-V characteristics of P-N junction diode.

$$I = I_0 \exp(qV/nkT) - 1 \quad (1)$$

Where the saturation current ( $I_0$ ) is equal to the diffusion current ( $I_d$ ) (Poyai, 2002).

$$I_0 = I_d = qn_i^2 A [D_n/L_n N_A + D_p/L_p N_D] \quad (2)$$

Where  $I$  is the current,  $q$  is the electron charge,  $V$  is the applied voltage,  $T$  is the absolute temperature,  $k$  is the Boltzmann constant,  $n$  is the ideality factor of P-N diode,  $A$  is the active area,  $n_i$  is the intrinsic carrier density, and  $I_0$  is the saturation current. For values of  $V$  greater than  $nkT/q$ ,  $D_n$  and  $D_p$  are the diffusion coefficient of electrons in the p-side and holes in the n-side,  $L_n$  and  $L_p$  are the electron and hole diffusion lengths. The ideality factor from Eq. (1) can be written as described by Equation 3 (Keffous et al., 2003; Sahin et al., 2005).

$$n = [q/kT][dV/d \ln I] \quad (3)$$

The voltage dependent ideality factor  $n(V)$  can be written by using Equation 3 as:

$$n(V) = qV/[kT \ln(I/I_0)] \quad (4)$$

From Equation 1,  $I_0$  is the saturation current. The saturation current under the reverse bias is the combination of the diffusion current ( $I_d$ ), as presented in Equation 4.

The forward and reverse bias I-V characteristic of the P-N diode before and after irradiated by the various X-ray energy and times, which can be explained by Equation 5 (Schroder, 1997).

$$I = I_0 [\exp(q(V - IR_s)/nkT) - 1] \quad (5)$$

From Eq. (5) the effect of the series resistance is usually modeled with series combination of a diode and a resistor  $R_s$ . The voltage  $V_d$  across the diode can be expressed in terms of the total voltage drop  $V$  across the diode and the resistance  $R_s$ . Thus,  $V_d = V - IR_s$  and the Equation 1 can be expressed as:

$$I = I_0 [\exp(q(V - IR_s)/nkT) - 1] \quad (6)$$

where  $q$  is the elementary charge,  $n$  is the ideality factor,  $k$  is the Boltzmann's constant,  $V$  is the biasing voltage,  $T$  is the temperature,  $R_s$  is the series resistance, and the  $IR_s$  term is the voltage drop across series resistance of device.

Several methods to extract the series resistance  $R_s$  of Schottky diode have been suggested. In our case, we have applied the methods developed by Cheung and Cheung (1986).

The Cheung's method is achieved by using the functions:

$$dV/d(\ln I) = IR_s - nkT/q \quad (7)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

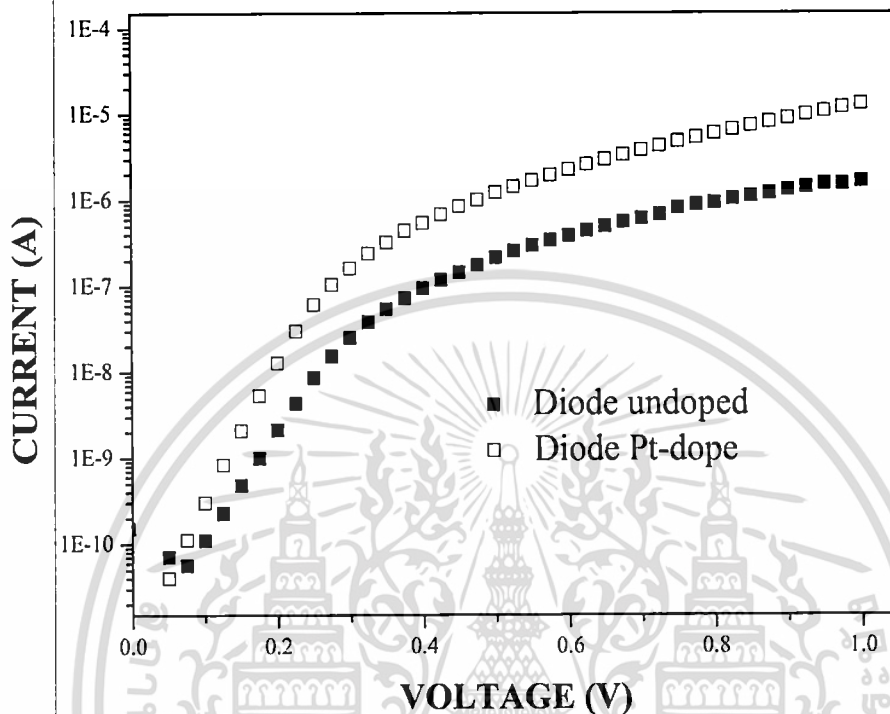


Figure 3. Improvement of forward current of the diode after Platinum dope.

Equation 7 should give a straight line for the data of the downward curvature region of the forward bias I-V characteristics. Thus, the slope and y-axis intercept of a plot of  $dV/d(\ln(I))$  versus  $I$  will give  $R_s$  and  $nkT/q$ , respectively.

Figure 2 shows the current-voltage (I-V) characteristics of Pt-dope P-N diode, which is shown that the reverse and forward currents after Pt-dope were both higher than the original values. However, while the leakage current only slightly increased, while the forward current changed more significantly. Figure 3 shows the semi-log scale of forward current characteristics of P-N diode. The forward current increased about 3 to 4 times after Pt-dope. The carrier recombination lifetime of P-N diode after Pt diffusion process decreased from 72 to 55  $\mu$ s and the series resistance increased from 10 to 18  $\Omega$ . This is shown that that Pt could significantly affect the carrier lifetime and series resistance of P-N diode. Although, the trend of forward current was rising but it was still considered to be below the expectation value. At present, the thermal annealing technique is widely used for treating the performance of device after fabrication. However, it cannot completely remove some defects during the fabrication process such as damages from Pt diffusion, high energy ion implantation and defects from lithography process.

This work presents a new technique for improving the forward current of device on silicon substrate. The soft X-ray annealing method is the technique for improving the performance of the diode. Figure 4 shows I-V characteristics of P-N diode before and after irradiation by X-ray at various energy and exposure times. From Figure 4, it can be noted that the reverse currents reduced slightly, while forward current increased. An interesting observation was that the forward current after irradiation increased much more significantly than the purely Pt-dope process. Figure 5 shows the typical result of the diode before and after irradiation. Figure 5 shows that the forward current increased by about 3 to 4 orders of magnitude. Many researchers have investigated the effect of radiation to the devices based on silicon. However their performance degraded after irradiation with high energy electron, neutron and proton (Simoen et al., 2002; Ohyama et al., 2001; Czerwinski et al., 2002; Takakura et al., 2006). Therefore, this paper presents a new approach of using low energy irradiation to improve the diode's performance, in which the carriers lifetimes of P-N diodes are determined by using the I-V characteristics (Poyai et al., 2003; Poyai et al., 2001). From the experiment results, the recombination lifetime decreased from 54 to 48  $\mu$ s. The series resistances of diode after irradiation also decrease from 10 to 10  $\Omega$ . The

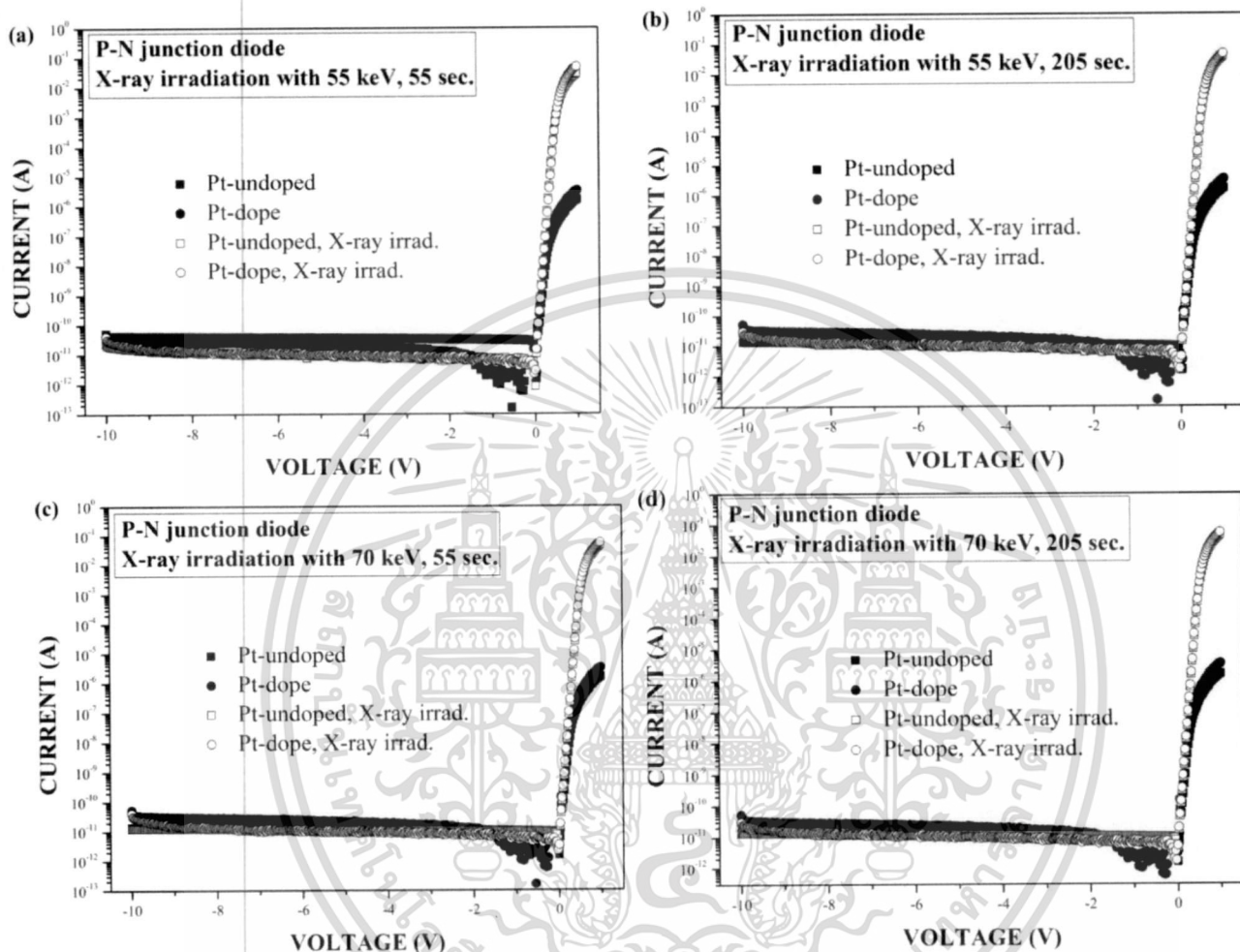


Figure 4. I-V characteristics after X-ray irradiation at different irradiation time and energy.

ideality factors of diode were not change by the value of 1, and the barrier height decreased from 0.95 to 0.9 eV, which is shown that soft X-ray annealing method can increase forward current and decrease series resistance.

**Conclusions**

The effect of soft X-ray annealing method was used to investigate the semiconductor fabricated samples and discussed. Results obtained have shown that the leakage current increased slightly after Pt-dope, while the forward current increased about 3 to 4 times. Pt-dope could also reduce the carrier lifetime, whereas the series resistance increased from the original value. The characteristics of diode after soft X-ray annealing process also increased. The leakage current slightly decreased. However, we

found that the forward current was increased by 3 to 4 orders of magnitude. The soft X-ray annealing technique could also reduce the recombination lifetime and series resistance of Pt-dope and undoped P-N diodes. In conclusion, the soft X-ray annealing is important technique to help the semiconductor industrial for improving device performance. This result is potentially important to the improvement of semiconductor device's performance for both semiconductor industry and other possible research avenues.

**ACKNOWLEDGEMENTS**

The authors would like to acknowledge King Mongkut's University of Technology North Bangkok and Thai Microelectronics Center (TMEC) for fabrication and

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

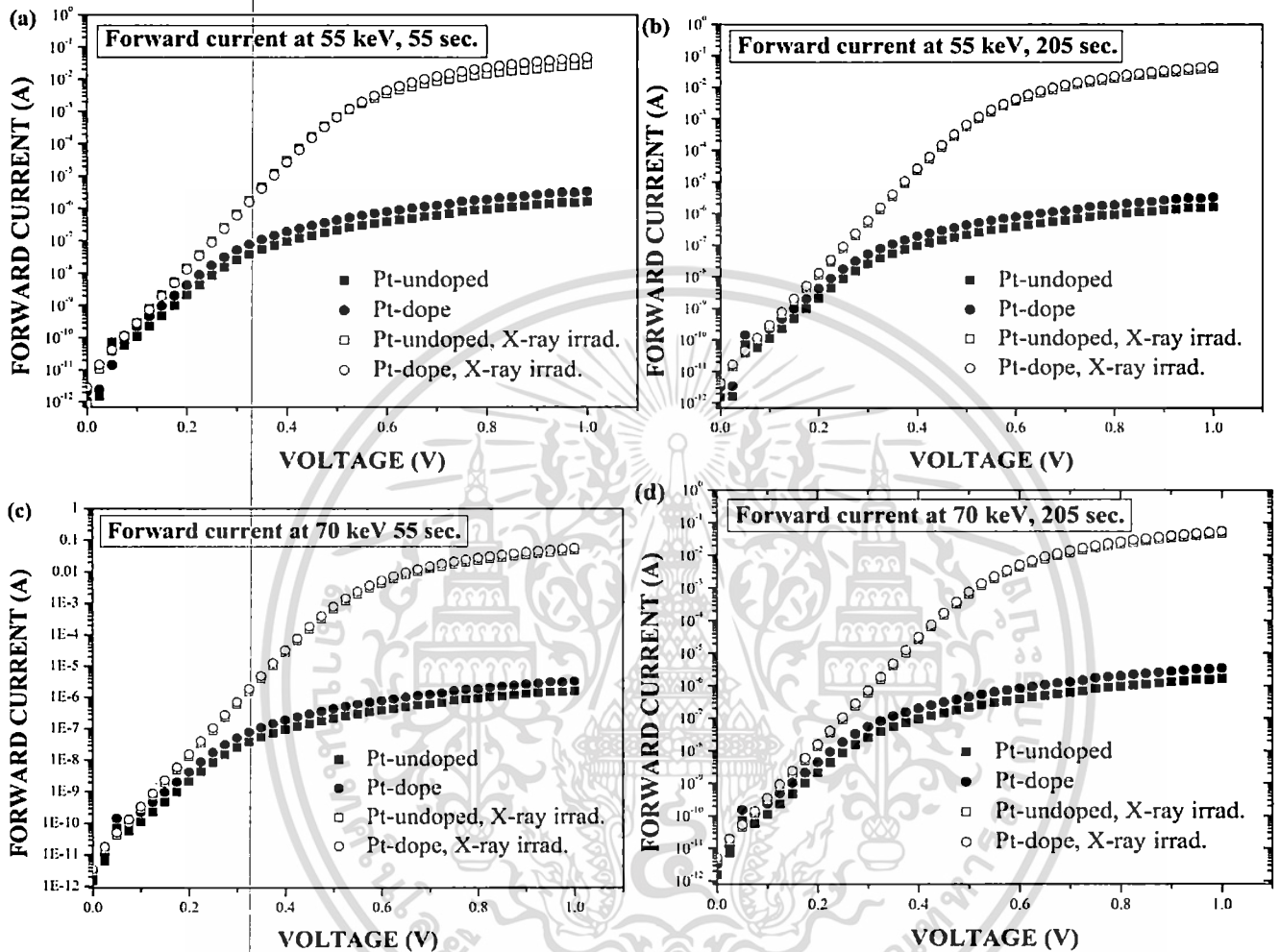


Figure 5. Forward current after X-ray irradiation of diode compares between dope and undoped Platinum.

testing facilities, National Electronics and Computer Technology Center, Thailand, and Thailand Graduate Institute of Science and Technology (TGIST).

#### REFERENCES

- Ayyildiz E, Turut A, Efeoglu H, Tuzemen S, Saglam M, Yogurtcu YK (1995). Effect of series resistance on the forward current-voltage characteristics of schottky diodes in the presence of interfacial layer. *solid-state electronics*, 39:83-87.
- Bourdelle KK, Chen Y, Ashton RA, Rubin LM, Agarwal A, Morris WA (2001). *IEEE Trans. Electron. Dev.*, 48: 2043.
- Cheung SK, Cheung NW, (1986). Extraction of Schottky diode parameters from forward current-voltage characteristics. *Appl. Phys. Lett.*, 49: 85.
- Czerwinski A, Katcki J, Ratajczak J, Simoen E, Poyai A, Claeys C, Ohyama H (2002). Impact of fast-neutron irradiation on the silicon p-n junction leakage and role of the diffusion reverse current. *ucl. Instr. Meth. Phys. Res. B.*, 186: 166-170.
- Felter TE, Hrubesh L, Kubota A, Davila L, Caturla M. (2003). Laser damage probability studies of fused silica modified by MeV ion implantation. *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. B.*, 207: 72-79.
- Keffous A, Siad M, Mamma S, Belkacem Y, Chaouch CL, Menari H, Dahmani A, Chergui W (2003) Effect of series resistance on the performance of high resistivity silicon Schottky diode. *Appl. Surf. Sci.*, 218: 336-342.
- Kuksenkov DV, Temkin H, Osinsky A, Gaska R, Khan MA (1997). Low-frequency noise and performance of GaN p-n junction photodetectors. *J. Appl. Phys.*, 97: 759-762.
- Li J, Han L, Duan J, Zhong J (2007). Interface mechanism of ultrasonic flip chip bonding. *Appl. Phys. Lett.*, 90: 242902.
- Li J, Liu L, Deng L, Ma B, Wang F, Han L (2011). Interfacial microstructures and thermodynamics of thermosonic Cu-wire bonding. *IEEE Electr. Device. L.*, 10: 1433-1435.
- Matsumoto Y, Nakazono A, Kitahara T, Koike Y (2002). High efficiency optical coupler for a small photo acceptance area communication. *Sensors and Actuators A: Physical*, 97-98: 318-322.
- Miller MD (1976). Differences between platinum and gold doped silicon power device. *IEEE Trans. Electron. Dev.*, 23: 1279-1283.
- Miller MD, Schade H, Nuese CJ (1976). Lifetime-controlling

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- recombination centers in platinum-diffused silicon. *J. Appl. Phys.*, 47: 275-279.
- Moffatt S, Hemment PLF, Whelan S, Armour DG (2000). Silicon damage studies due to ultra-low-energy ion implantation with heavy species and rapid thermal annealing. *Mat. Sci. Semicon. Proc.*, 3: 291-296.
- Ohyama H, Hirao T, Simoen E, Claeys C, Onoda S, Takami Y, Itoh H (2001). Impact of lattice defects on the performance degradation of Si photodiodes by high-temperature gamma and electron irradiation. *Physica B*, 308-310: 1226-1229.
- Poyai A (2002). Defect assessment in advanced semiconductor materials and devices, pp. 99-163.
- Poyai A, Simoen E, Claeys C, Rooyackers R, Badenes G (2001). Lifetime study in advance isolation techniques. *Mater. Sci. Semicond. Process.*, 4: 137-139.
- Poyai A, Simoen E, Claeys C, Gaubas E, Huber A, Graf D (2003). Extraction of the carrier generation and recombination lifetime from the forward characteristics of advanced diodes. *Material Sc & Eng. B.*, 102: 189-192.
- Sahin B, Cetin HC, Ayyildiz E (2005). The effect of series resistance on capacitance-voltage characteristics of Schottky barrier diodes. *Solid State Comm.*, 135: 490-495.
- Schroder DK (1997). Carrier lifetimes in silicon. *IEEE Trans. Electron. Dev.*, 44: 160-170.
- Simoen E, Claeys C, Privitera V, Coffa S, Kokkoris M, Kossionides E, Fanourakis G, Larsen AN, Clauws P (2002). DLTS and PL studies of proton radiation defects in tin-doped FZ silicon. *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. B.*, 186: 19-23.
- Srithanachai I, Niemcharoen S (2011). Influence of X-ray irradiated on junction depth of P-N diode. *The 5<sup>th</sup> PSU-UNS Int. Conf. Eng. technol.*, 1: 498-501.
- Sundarasaradula Y, Srithanachai I, Ueamanapong S, Atiwongsaengthong N, Poyai A, Niemcharoen S, Titiroongruang W (2011). Electrical characteristics of X-ray irradiation on PN diode. *Electrical characteristics of X-ray irradiation on PN diode. The 5<sup>th</sup> PSU-UNS Int. conf. eng. technol.*, 1: 461-464.
- Takakura K, Hayama K, Watanabe D, Ohyama H, Kudou T, Shigaki K, Matsuda S, Kuboyama S, Kishikawa T, Uemurac J, Simoen E, Claeys C (2006). Radiation defects and degradation of Si photodiodes irradiated by neutrons at low temperature. *Physica B*, 376-377: 403-406.
- Valdinoci M, Colalongo L, Pellegrini A, Rudan M (1996). Analysis of conductivity degradation in Gold/Platinum-doped silicon. *IEEE Trans. Electron. Dev.*, 43: 2269-2275.
- Wallgren K, Sotiropoulos S (1999). Oxygen sensors based on a new design concept for amperometric solid state devices. *Sensors and Actuators B*, 60: 174-183.
- Williams JS (1998). Ion implantation of semiconductors. *Mater. Sci. Eng. A.*, 253: 8-15.
- Williams JS (1998). Ion implantation of semiconductors. *Mater. Sci. Eng. B.*, 253: 8-15.

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล นายจิรวัดน์ ปราบเขต  
วัน เดือน ปีเกิด 27 กันยายน 2524 ที่จังหวัดตรัง  
ที่อยู่ 54 หมู่ที่ 1 ตำบลนาวง อำเภอห้วยยอด จังหวัดตรัง 92210  
โทร.075-264-090

ประวัติการศึกษา พ.ศ. 2548 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
พ.ศ.2550 วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไมโคร  
อิเล็กทรอนิกส์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร  
ลาดกระบัง

ความชำนาญเฉพาะด้าน 1. การออกแบบ และกระบวนการสร้างอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ  
2. ซิลิคอนไดโอดกำลังแบบ PIN  
3. กระบวนการควบคุมอายุพายุในซิลิคอน

### ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์

- [1] Jirawat Prabket, Wisut Titiroongruang, Amporn Poyai, Udom Techakijkajorn, “Extraction of the Characterization of Deep-Level Impurity Density in Platinum-Doped Silicon,” NECTEC Technical Journal, NECTEC-ACE2008 Special Edition, 24-25 September 2008, Bangkok Convention Centre, Sofitel Centara Grand Bangkok, Bangkok
- [2] Jirawat Prabket , Montree Saenlamool , Wittawat Yamwong , Udom Techakijkajorn, Amporn ,Poyai, Wisut Titiroongruang, “Improving Forward Current Density of Silicon PIN Diodes by Pt-Diffusion Method” The 25<sup>th</sup> International Technical Conference on Circuits/Systems, Computer and Communications (ITC-CSCC 2010)Ambassador Pattaya, Thailand on July 4-7, 2010
- [3] จิรวัดน์ ปราบเขต, มนตรี แสนละมุล, วิทวัส แยมวงษ์, อุดม เตชะกิจจจร, อัมพร โพธิ์ไย, สุรศักดิ์ เนียมเจริญ และ วิสุทธิ ฐิติรุ่งเรือง, “การวิเคราะห์กระแสรั่วไหลรอยต่อของซิลิคอนไดโอดแบบ PIN ที่ผ่านการเติมอะตอมแพลตินัม” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 33 ,1-3 ธันวาคม 2553 ณ โรงแรมเซ็นทารา ดวงตะวัน จังหวัดเชียงใหม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [4] **Jirawat Prabket** , Montree Saenlamool , Wittawat Yamwong , Udom Techakijkajorn, Amporn Poyai , Wisut Titiroongruang,” Determination of Schottky Barrier Parameters of Al Schottky Contacts on Pt- Doped FZ n-Si for Low Loss Rectifiers” The 12<sup>th</sup> International Symposium on Eco-materials Processing & Design (ISEPD 2011), The Empress Hotel, Chiang Mai, Thailand on Jan 8-11, 2011
- [5] **Jirawat Prabket** , Montree Saenlamool , Wittawat Yamwong, Udom Techakijkajorn, Amporn Poyai, Wisut Titiroongruang ” TEMPERATURE DEPENDENCE OF CURRENT-VOLTAGE CHARACTERISTICS OF Al/Pt-DOPED Si SCHOTTKY DIODES” The 5<sup>th</sup> PSU-UNS International Conference on Engineering and Technology (ICET-2011), Phuket, May 2-3, 2011
- [6] **จิรวัดน์ ปราบเขต**, วิวัฒน์ อธิธิกุสุมาลย์, มนตรี แสนละมุล, วิทวัส แยมวงษ์, อุดม เตชะกิจจจร, อัมพร โพธิ์ไย, สุรศักดิ์ เนียมเจริญ และ วิสุทธิ์ ฐิตีรุ่งเรือง, “วิเคราะห์ลักษณะจุดบกพร่อง และ อายุพหุในซิลิคอนไดโอดที่ผ่านการเติมอะตอมแพลตินัม ”,การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 34,โรงแรมแอมบาสซาเดอร์ซิตี้จอมเทียน พัทยา จ.ชลบุรี , 30 พฤศจิกายน-2 ธันวาคม 2554
- [7] Wiwat Itthikusumarn, Wittawat Yamwong, Amporn Poyai, **Jirawat Prabket**, Chaba Suriyaammaranon and Wisut Titiroongruang, “Series Resistance Reduction by Wafer Backgrinding Process”,การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 34,โรงแรมแอมบาสซาเดอร์ซิตี้จอมเทียน พัทยา จ.ชลบุรี ,26-28 ตุลาคม 2554
- [8] วิวัฒน์ อธิธิกุสุมาลย์, วิทวัส แยมวงษ์ , อัมพร โพธิ์ไย , **จิรวัดน์ ปราบเขต** , ชบา สุริยอัมรานนท์ , และ วิสุทธิ์ ฐิตีรุ่งเรือง, “การพิจารณาระดับพลังงานที่ใช้อยู่ต่อมสารเจือสำหรับการสร้างซีเนอร์ไดโอด”,การประชุมวิชาการ ม.อ.ภูเก็ต วิจัย ครั้งที่ 4 (2554) วันที่ 16-18 พฤศจิกายน 2554, ณ ม.อ.ภูเก็ต
- [9] **Jirawat Prabket**, Itsara Srithanachai, Surada Ueamanapong, Amporn Poyai, Wisut Titiroongruang, Surasak Niemcharoen and Preecha P. Yupapin,” An improvement of electrical characteristics of P-N diode by X-ray irradiation method” Scientific Research and Essays Vol. 7(11), pp. 1230-1236, 23 March, 2012
- [10] **Jirawat Prabket**, Wiwat Itthikusaman, Narin Attiwongsangthon, Amporn Poyai , Wisut Titiroongruang, “Evaluation of Schottky barrier parameters of Al Schottky contacts on Platinum Doped n-Silicon”, 9<sup>th</sup> International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON), Cha Am Beach, Thailand May 16-18, 2012.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้